



**Marco José Pinto Pacheco Alves**

Licenciado em Ciências da Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

## **Deteção de Quench em Limitadores de Corrente Supercondutores do tipo Indutivo através de Sondas de Hall**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Electrotécnica e de Computadores**

Orientador: João Miguel Murta Pina, Prof.Doutor, FCT/UNL

Júri

Presidente: Prof. Doutor Tiago Oliveira Machado de Figueiredo Cardoso, FCT/UNL  
Arguente: Prof. Doutora Anabela Monteiro Gonçalves Pronto, FCT/UNL



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Setembro, 2016**



## **Deteção de Quench em Limitadores de Corrente Supercondutores do tipo Indutivo através de Sondas de Hall**

Copyright © Marco José Pinto Pacheco Alves, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



*Aos meus pais*



## AGRADECIMENTOS

Chegando agora ao término desta fase tão importante da minha vida gostaria de exprimir de uma forma mais pessoal o meu agradecimento a todos os que me apoiaram durante esta jornada.

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao meu orientador Professor João Murta Pina por me ter despertado o interesse pela área da energia e me ter apresentado à supercondutividade. Gostaria de agradecer também a sua simpatia e disponibilidade para ajudar em tudo o que foi necessário. Mesmo quando o tempo que tinha não era muito, nunca deixou de esclarecer as minhas dúvidas fossem elas convenientes ou inconvenientes.

À Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa pelo acolhimento e formação de enorme qualidade.

Ao departamento de Engenharia Eletrotécnica e pelas boas condições de trabalho, pelos materiais disponibilizados e pelo o ótimo ambiente entre professores e alunos.

Um agradecimento especial aos meus colegas do laboratório de supercondutividade do DEE, que estiveram presentes durante toda a realização deste projeto, sempre dispostos a ajudar e partilhar os seus conhecimentos.

Um enorme agradecimento, o mais sentido de todos, aos meus pais. Foram eles que me deram a oportunidade de realizar um curso superior. Todo o esforço feito ao longo do curso foi por eles. Obrigado por acreditarem em mim, pelo apoio, pelos valores e responsabilidades que me ensinaram. Sem vocês, não seria o que sou. Por toda a paciência, compreensão e confiança. Muito obrigado.

A todos os meus amigos de Setúbal, que sempre me apoiaram e acompanharam. A todos os meus amigos que foram de Setúbal para o mesmo curso, Filipe Dionísio, Diogo Teixeira, Ricardo Alves, João Bravo, Pedro Teixeira. Sei que me vão acompanhar no meu futuro e agradeço-lhes por todo o companheirismo, amizade e bons momentos.

Por último mas não menos importante, à Matilde. Pela companhia, paciência, amizade e amor. Agradeço-te do fundo do coração pela pessoa que és. Sei que não é fácil, mas sem ti, sem o teu apoio não teria sido o mesmo.





## RESUMO

---

Um dos aspetos chave quando se introduz uma tecnologia baseada em Supercondutores de Alta Temperatura (SAT), tais como em limitadores de corrente é assegurar a coordenação das proteções. Durante um evento de curto-circuito, o limitador limita a corrente sendo que a falha pode passar despercebida. No entanto este fenómeno é facilmente detectado monitorizando a queda de tensão aos terminais do limitador.

No entanto, nos limitadores de corrente do tipo transformador com supercondutores no secundário, surge um problema diferente. Caso uma das espiras do secundário sofra um *Quench*, sob a operação normal da rede, surge uma tensão indutiva devido ao aumento de fluxo ligado, originando um falso curto-circuito que é identificado pelas proteções. Nesta dissertação é apresentado um método para solucionar este problema, encarando a topologia de limitadores de corrente com um curto-circuito no secundário construído com fitas SAT de segunda geração. O método consiste na leitura da densidade de fluxo obtida a partir de vários sensores de Hall colocados perpendicularmente às fitas, fornecendo então uma solução mais simples comparativamente à monitorização de tensões, que neste caso pode não ser o método mais viável.

**Palavras-chave:** Supercondutores de Alta Temperatura, limitadores de corrente supercondutor de tipologia indutiva, *Quench*, Sensores de Hall.

---



## ABSTRACT

---

One key aspect that utilities require when introducing based on high temperature superconductors (HTS), such as fault current limiters (FCL), is assuring coordination of protections. Under a short-circuit event, FCL limits current and the fault could potentially remain undetected. This is easily addressed by measuring voltage drop at the terminals of the FCL, which will abruptly increase under the fault.

Yet, a different problem arises in inductive FCL of transformer type with superconducting secondary. If one or more turns of the latter quench under normal grid operation, an inductive voltage develops due to increased linked flux and a false short-circuit is identified by protections. In this thesis, a method to address this problem is presented envisaging the mentioned FCL topology with short-circuit secondary built by second generation HTS tapes. The proposed approach is based on flux density measurements obtained from a matrix of Hall sensors perpendicular to secondary tapes and intends to provide a simpler solution when comparing to common voltage monitoring of sections of turns, which may also become infeasible in such applications.

**Keywords:** High Temperature superconductors (HTS), Inductive Fault Current Limiter (FCL), Quench, Hall Sensors

---



# ÍNDICE

<b>Lista de Figuras</b>	<b>xv</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xix</b>
<b>Glossário</b>	<b>xxi</b>
<b>Siglas</b>	<b>xxiii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação . . . . .	1
1.2 Objetivos . . . . .	2
1.3 Contribuições originais . . . . .	2
1.4 Organização da dissertação . . . . .	3
<b>2 Revisão Bibliográfica</b>	<b>5</b>
2.1 Supercondutividade . . . . .	5
2.1.1 Enquadramento Histórico . . . . .	5
2.1.2 Propriedades dos Supercondutores . . . . .	7
2.1.3 Limites da Supercondutividade . . . . .	10
2.1.4 Classificação dos Supercondutores . . . . .	10
2.2 Supercondutores de Alta Temperatura . . . . .	12
2.2.1 Modelização . . . . .	12
2.2.2 Tecnologia dos Materiais . . . . .	13
2.3 Limitadores de Corrente . . . . .	14
2.3.1 Limitadores de Corrente Convencionais . . . . .	15
2.3.2 Limitadores de Corrente Supercondutores . . . . .	16
2.4 Fenómeno de "Quench" . . . . .	20
2.4.1 Estado da Arte . . . . .	21
2.4.2 Técnicas de Detecção de "Quench" . . . . .	21
2.5 Síntese e Conclusões . . . . .	27
<b>3 Modelo Conceptual e Simulações</b>	<b>29</b>
3.1 Princípio de Funcionamento . . . . .	30
3.1.1 Dimensionamento do circuito . . . . .	31

3.2	Simulação do Sistema . . . . .	33
3.3	Implementação Experimental . . . . .	34
3.3.1	Aquisição de Dados . . . . .	34
3.3.2	Sensores de Hall . . . . .	35
3.3.3	Aquisição da Tensão aos terminais do Limitador de Corrente Supercondutor . . . . .	37
3.3.4	Aspectos Construtivos . . . . .	37
3.4	Síntese e Conclusões . . . . .	41
<b>4</b>	<b>Análise e Discussão de Resultados</b>	<b>43</b>
4.1	Ensaio 1 : Uma espira supercondutora, funcionamento normal . . . . .	43
4.2	Ensaio 2: Uma espira supercondutora, funcionamento em caso de falha .	46
4.3	Ensaio 3: Uma espira supercondutora, simulação de <i>Quench</i> . . . . .	48
4.4	Ensaio 4: Duas espiras supercondutoras, funcionamento normal . . . . .	49
4.5	Ensaio 5: Duas espiras supercondutoras, funcionamento em caso de falha	50
4.6	Ensaio 6: Duas espiras supercondutoras, simulação de <i>quench</i> . . . . .	52
4.6.1	Simulação de <i>quench</i> na fita A . . . . .	52
4.6.2	Simulação de <i>quench</i> na fita B . . . . .	53
4.7	Ensaio 7: Três espiras supercondutoras, funcionamento normal . . . . .	54
4.8	Ensaio 8: Três espiras supercondutoras, funcionamento em caso de falha .	56
4.9	Ensaio 9: Três espiras supercondutoras, simulação de <i>quench</i> . . . . .	58
4.9.1	Simulação de <i>quench</i> na fita A . . . . .	59
4.9.2	Simulação de <i>quench</i> na fita B . . . . .	60
4.9.3	Simulação de <i>quench</i> na fita C . . . . .	60
4.10	Síntese e conclusões . . . . .	62
<b>5</b>	<b>Conclusões e Trabalho Futuro</b>	<b>63</b>
5.1	Conclusões . . . . .	63
5.2	Trabalho futuro . . . . .	64
	<b>Bibliografia</b>	<b>65</b>

## LISTA DE FIGURAS

2.1	Heike Kamerling Onnes . . . . .	6
2.2	Resistividade em função da temperatura absoluta. Resultados experimentais de Onnes a 26 de Outubro de 1911[2] . . . . .	6
2.3	Variação da Resistência de metais a baixas temperaturas de acordo com as três teorias mais populares do século XX[1] . . . . .	6
2.4	Resistividade vs temperatura em supercondutores e condutores convencionais[3] . . . . .	8
2.5	Anel supercondutor[3] . . . . .	9
2.6	Efeito Meissner[3] . . . . .	9
2.7	Espaço de estados de um supercondutor . . . . .	10
2.8	Curva de Magnetização dos supercondutores Tipo I . . . . .	11
2.9	Curva de Magnetização dos supercondutores Tipo II . . . . .	12
2.10	Descrição do supercondutor 2G da Superpower. Adaptado de <a href="http://www.superpower-inc.com/content/2g-hts-wire">http://www.superpower-inc.com/content/2g-hts-wire</a> , último acesso dia 18 de Março de 2016 . . . . .	14
2.11	Exemplos de Limitadores de Corrente Convencionais . . . . .	16
2.12	Classificação dos limitadores de corrente supercondutores[10]. . . . .	17
2.13	Circuito equivalente de um LCS resistivo . . . . .	18
2.14	Circuito equivalente de um LCS Rectificador . . . . .	19
2.15	Esquema elétrico do LCS indutivo do tipo transformador . . . . .	19
2.16	Método de detecção tradicional de <i>quench</i> utilizando tensão[13]. . . . .	21
2.17	Circuitio referente ao método de eliminação Gaussiana[13]. . . . .	22
2.18	Circuito base de um método de detecção de potência ativa parcial, adaptado de[15]. . . . .	22
2.19	Diagrama esquemático do sistema aperfeiçoado. Adaptado de[14][15]. . . . .	23
2.20	Diagrama de blocos do sistema de detecção de <i>quench</i> [18]. . . . .	25
2.21	Esquema equivalente de um par de enrolamentos do magneto[18]. . . . .	25
3.1	LCS indutivo do tipo transformador utilizado nos ensaios laboratoriais . . . . .	30
3.2	Esquema da montagem utilizada nos ensaios laboratoriais . . . . .	31
3.3	Esquema simplificado da montagem em funcionamento normal . . . . .	32
3.4	Modelo de simulação do Limitador de corrente supercondutor indutivo monofásico . . . . .	34

3.5	Placa de aquisição de dados NI-6008 da <i>National Instruments</i> . . . . .	34
3.6	Diagrama relativo ao funcionamento do sensor de Hall KSY14. . . . .	35
3.7	Diagrama esquemático da fonte de corrente para os sensores de Hall . . . . .	36
3.8	Circuito de adaptação da tensão de Hall às especificações da placa de aquisição de dados . . . . .	37
3.9	Montagem subtratora . . . . .	37
3.10	Representação de corte transversal do secundário do LCS . . . . .	38
3.11	Base para o sistema de detecção . . . . .	39
3.12	Suporte com o sistema de detecção . . . . .	39
3.13	Resistência utilizada como <i>heater</i> . . . . .	40
3.14	<i>Heater</i> isolado com fita isoladora . . . . .	40
4.1	Configuração com 1 espira supercondutora no secundário . . . . .	44
4.2	Montagem experimental utilizada para a realização dos ensaios. . . . .	44
4.3	Corrente de Linha e Tensão de Hall com uma espira no secundário. . . . .	45
4.4	Gráficos em detalhe da Corrente de Linha e Tensão de Hall com uma espira no secundário . . . . .	46
4.5	Tensão aos terminais do limitador . . . . .	46
4.6	Corrente na Linha e Tensão de Hall com uma espira no secundário em caso de falha. . . . .	47
4.7	Tensão aos terminais do limitador . . . . .	47
4.8	Tensão de Hall e tensão aos terminais do limitador com uma espira no secundário em caso de <i>quench</i> . . . . .	48
4.9	Corrente na linha com a simulação de <i>quench</i> . . . . .	49
4.10	Configuração com 2 espiras supercondutoras no secundário . . . . .	49
4.11	Corrente na linha para duas espiras no secundário em regime normal . . . . .	50
4.12	Tensão aos terminais do limitador com duas espiras supercondutoras em regime normal . . . . .	50
4.13	Tensão de Hall com duas espiras no secundário em regime normal . . . . .	51
4.14	Corrente na linha e Tensão de Hall com duas espiras no secundário em regime de falha . . . . .	51
4.15	Tensão aos terminais do limitador em regime de falhar com duas espiras no secundário . . . . .	52
4.16	Tensões de Hall nas fitas SAT com <i>quench</i> na fita A . . . . .	53
4.17	Tensão aos terminais do limitador com <i>quench</i> na fita A . . . . .	53
4.18	Tensões de Hall nas fitas SAT com <i>quench</i> na fita B . . . . .	54
4.19	Tensão aos terminais do limitador com <i>quench</i> na fita B . . . . .	54
4.20	configuração com 3 espiras supercondutoras no secundário . . . . .	55
4.21	Corrente na linha para três espiras no secundário em regime normal . . . . .	55
4.22	Tensão aos terminais do limitador com três espiras supercondutoras em regime normal . . . . .	55



4.23 Tensões de Hall com três espiras no secundário em regime normal . . . . .	56
4.24 Corrente na linha . . . . .	56
4.25 Tensão de Hall na fita A . . . . .	57
4.26 Tensão de Hall na fita B . . . . .	57
4.27 Tensão de Hall na fita C . . . . .	58
4.28 Tensão aos terminais do limitador com três espiras supercondutoras em caso de falha . . . . .	58
4.29 Tensões de Hall das espiras com <i>quench</i> na fita A . . . . .	59
4.30 Tensão aos terminais do limitador com <i>quench</i> na fita A . . . . .	59
4.31 Tensões de Hall das espiras com <i>quench</i> na fita B . . . . .	60
4.32 Tensão aos terminais do limitador com <i>quench</i> na fita B . . . . .	61
4.33 Tensões de Hall das espiras com <i>quench</i> na fita C . . . . .	61
4.34 Tensão aos terminais do limitador com <i>quench</i> na fita C . . . . .	62



## LISTA DE TABELAS

2.1	Temperatura crítica dos SAT de maior aplicação em dispositivos de potência	12
3.1	Características da fita supercondutor SCS4050 . . . . .	31
3.2	Corrente máxima admitida pelo primário para diferentes números de espiras supercondutoras . . . . .	32
3.3	Valores de corrente usados para diferentes números de espiras supercondutoras	32
3.4	Diferentes Valores de tensão de entrada para diferentes números de espiras supercondutoras . . . . .	33



## GLOSSÁRIO

- $B$  Densidade de Fluxo Magnético T .
- $E$  Vetor Campo Elétrico  $V.m^{-1}$  .
- $E_c$  Campo Elétrico quando é atingido a densidade de corrente crítica  $V.m^{-1}$  .
- $F$  Força Eletrostática C .
- $H$  Campo Magnético  $A.m^{-1}$  .
- $H_c$  Campo Magnético Crítico  $A.m^{-1}$  .
- $H_{c1}$  Campo Magnético Crítico Superior  $A.m^{-1}$  .
- $H_{c2}$  Campo Magnético Inferior  $A.m^{-1}$  .
- $I_H$  Corrente de alimentação dos sensores de Hall A .
- $I_L$  Corrente de Linha A .
- $I_p$  Corrente Elétrica do enrolamento primário A .
- $I_s$  Corrente Elétrica do enrolamento secundário A .
- $J$  Densidade de Corrente Elétrica  $A.m^{-1}$  .
- $J_c$  Densidade de Corrente Crítica  $A.m^{-1}$  .
- $M$  Vetor Magnetização  $V.m^{-1}$  .
- $N_p$  Numero de espiras do enrolamento primário .
- $N_s$  Numero de espiras do enrolamento secundário .
- $R$  Resistência Elétrica  $\Omega$  .
- $R_C$  Resistência de Carga  $\Omega$  .
- $R_G$  Resistência de Ganho  $\Omega$  .
- $R_L$  Resistência de Linha  $\Omega$  .

## GLOSSÁRIO

---

$T$  Temperatura K .

$U_H$  Tensão proveniente dos sensores de Hall V .

$U_{fonte}$  Tensão a ser imposta pelo Auto-transformador V .

$V_O$  Sinal de tensão da saída da montagem subtratora V .

$p$  Potência Instantânea W .

## SIGLAS

**1G** Fita Supercondutora de Primeira Geração.

**2G** Fita Supercondutora de Segunda Geração.

**AC** Corrente Alternada.

**ADC** *Analog to Digital Converter.*

**AT** Alta Tensão.

**Bi-2223** Supercondutor com composição química  $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{12}$ .

**Bi-2212** Supercondutor com composição química  $Bi_2Sr_2Ca_1Cu_2O_8$ .

**BSCCO** Designação genérica de um supercondutor  $(Bi,Pb)_2Sr_2Ca_2Cu_3O_x$ .

**BT** Baixa Tensão.

**DQD** *Digital Quench Detection.*

**FMM** Força Magnetomotriz.

**HBCCO** Designação genérica de um supercondutor  $Hg_1Ba_2Ca_2Cu_3O_y$ .

**LCS** Limitador de Corrente Supercondutor.

**MT** Média Tensão.

**NI** *National Instruments.*

**RTD** *Resistance Temperature Detectors.*

**SAT** Supercondutor de Alta Temperatura.

**SMES** *Superconducting Magnetic Energy Storage Sistem.*

**TBCCO** Designação genérica de um supercondutor  $Tl_1Ba_2Ca_2Cu_3O_v$ .

## SIGLAS

---

**UCP** Unidade Central de Processamento.

**YBCO** Designação genérica de um supercondutor  $YBa_2Cu_3O_7$ .



## INTRODUÇÃO

A detecção da transição incontrolada do estado supercondutor para o estado resistivo em materiais com estas propriedades é um ponto de enorme importância no campo da proteção deste tipo de materiais face a falhas estruturais, elétricas e térmicas. Na presente dissertação é aprofundado este tema, através do estudo dos mecanismos necessários à detecção deste fenómeno, recorrendo a um método baseado na leitura rápida e eficaz de campos magnéticos.

### 1.1 Motivação

Hoje em dia existe uma crescente preocupação, com questões de sustentabilidade energética, onde a otimização de sistemas de produção, transporte e consumo de energia ganham uma extrema importância. Com efeito, o estudo e desenvolvimento de tecnologias de produção de energia renovável, nos últimos tempos, tem tido uma grande evolução, permitindo um elevado progresso tecnológico. A otimização do armazenamento de energia e consequente utilização de materiais supercondutores para esse fim, pode ser uma escolha viável para um melhor aproveitamento dos recursos energéticos existentes.

O grande crescimento da produção de energias renováveis leva ao constante desenvolvimento da rede, que vão sendo constituídas por uma enorme diversidade de equipamentos de potência à medida que vão ficando mais complexas. Todos estes dispositivos estão sujeitos à possível ocorrência de falhas, em grande parte correntes de curto-circuito.

Graças à descoberta dos materiais supercondutores, e juntando a este fator o aumento da sua produção, foi possível o desenvolvimento de uma alternativa à proteção da rede, os limitadores de corrente supercondutores do tipo indutivo. Estes, comparativamente a outros dispositivos de proteção, têm a vantagem de em funcionamento normal serem invisíveis à rede, realizando um trabalho imprescindível no que toca a limitar correntes

de curto-circuito.

Um inconveniente dos materiais supercondutores é a facilidade com que perde as suas propriedades. Para que esta dificuldade seja ultrapassada, é essencial uma deteção rápida eficaz desta perda de propriedades, prevenindo assim futuras consequências no bom funcionamento do sistema e também a integridade do material em questão.

Assim sendo a importância da proteção aliada à difícil detecção atempada da perda das propriedades supercondutoras do material, constitui a base motivacional do trabalho desenvolvido.

### 1.2 Objetivos

A presente dissertação tem como principal objetivo analisar uma solução prática e eficaz de deteção da perda das propriedades supercondutoras dos materiais supercondutores constituintes de um limitador de corrente supercondutor do tipo indutivo. Aliado a este objetivo também existe a intenção de detetar um falso curto-circuito no limitador, por consequência da degradação do material supercondutor.

Ao longo deste processo foram atingidas as seguintes metas estipuladas previamente:

- Estudo teórico dos limites da supercondutividade;
- Concepção do sistema de deteção e de reprodução de forma controlada o fenómeno de *quench*;
- Projeto e simulação do sistema a implementar;
- Implementação do protótipo e respetivos ensaios;
- Análise dos resultados obtidos nos ensaios laboratoriais;

### 1.3 Contribuições originais

O trabalho desenvolvido neste documento, deu origem à submissão de um resumo intitulado "*A method for quench detection in inductive superconducting fault current limiters of transformer type*" para apresentação na conferência ASC 2016 "*Applied Superconductivity Conference*".

## 1.4 Organização da dissertação

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos. Para além deste capítulo de introdução, os restantes são resumidos de seguida.

- **Capítulo 2: Revisão Bibliográfica** São abordados os pontos teóricos necessários ao desenvolvimento desta dissertação. Em primeiro lugar, introduzem-se os conceitos fundamentais relativamente à supercondutividade, os diferentes tipos de supercondutores e até os tipos de aplicações dos limitadores de corrente. Explora-se ainda o fenómeno de *quench* e os vários métodos de deteção deste existentes hoje em dia.
- **Capítulo 3: Modelo Conceptual e simulações** É apresentado o sistema concebido, o seu princípio de funcionamento bem como a validação do método proposto recorrendo à ferramenta de simulações Flux2D. Apresentam-se também os diferentes componentes constituintes utilizados e o seu dimensionamento.
- **Capítulo 4: Análise e Discussão de Resultados** São descritos os equipamentos utilizados para a realização dos ensaios laboratoriais, bem como a função de cada um. Procede-se à análise de resultados provenientes dos ensaios laboratoriais. São ilustrados os comportamentos dos diferentes campos magnéticos induzidos nas fitas em funcionamento normal, falha e em caso de *quench*.
- **Capítulo 5: Conclusões e Trabalho Futuro** É neste último capítulo onde são apresentadas as conclusões face aos resultados obtidos sendo também feita uma reflexão final acerca do desenvolvimento da dissertação. São ainda sugeridos alguns possíveis trabalhos futuros que poderão ser uma mais valia para uma exploração mais profunda deste tema.



## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são abordados os principais pontos ao desenvolvimento desta dissertação. São assim apresentados assuntos como os limitadores de corrente, supercondutividade, tendo como foco mais pormenorizado os supercondutores de alta temperatura e o fenómeno de *Quench*.

### 2.1 Supercondutividade

Nesta secção é abordado o enquadramento histórico da descoberta da supercondutividade, descrevendo a sua evolução ao longo dos anos, as suas propriedades mais importantes e os diferentes tipos de materiais existentes.

#### 2.1.1 Enquadramento Histórico

Em 1911, Heike Kamerling Onnes (figura 2.1) numa das suas investigações deparou-se com um fenómeno que denominou por supercondutividade, que afetava as propriedades do mercúrio a temperaturas muito baixas. Esta experiência, mostrou que quando uma amostra de mercúrio era arrefecida abaixo do ponto de ebulição do hélio ( $4.2K$ ), a resistência da amostra de mercúrio tendia em desaparecer de uma forma abrupta à medida que a temperatura se aproximava do zero absoluto ( $0K$ ) como ilustra a figura 2.2. Onnes descobriu subsequentemente que ao adicionar pequenas quantidades de impurezas no mercúrio, não surtia qualquer efeito na transição de temperatura. Este fator implicava que o fenómeno da supercondutividade era intrínseca ao material. A descoberta desta característica foi uma surpresa, pois os resultados esperados foram diferentes, tendo em conta todas as teorias formuladas relativamente a este assunto (figura 2.3). Este foi o ponto de partida para a descoberta de materiais que partilhavam a mesma propriedade da supercondutividade como o mercúrio[1].



Figura 2.1: Heike Kamerling Onnes

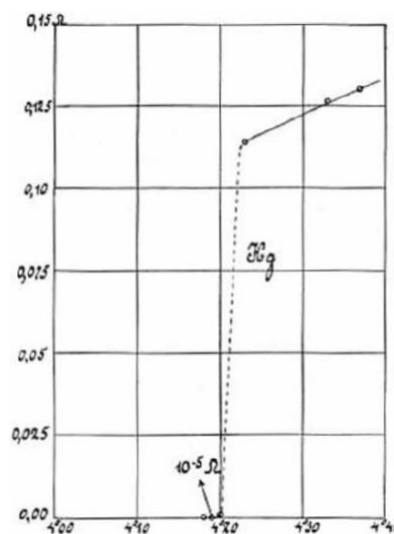


Figura 2.2: Resistividade em função da temperatura absoluta. Resultados experimentais de Onnes a 26 de Outubro de 1911[2]

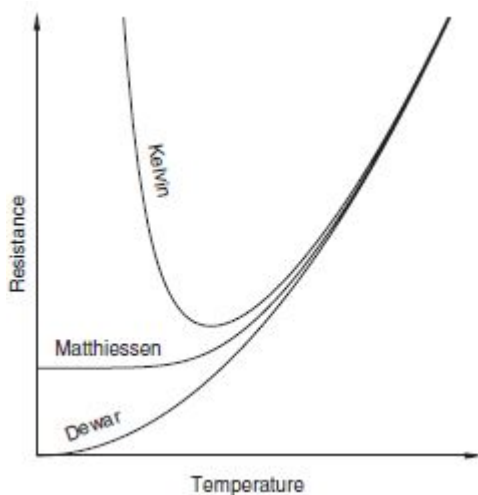


Figura 2.3: Variação da Resistência de metais a baixas temperaturas de acordo com as três teorias mais populares do século XX[1]

Até ao início dos anos 30, já tinham sido descobertos inúmeros factos experimentais relativamente à supercondutividade, nomeadamente o número de elementos supercondutores. Em todos estes materiais a sua resistividade diminuía à medida que eram arrefecidos até à temperatura crítica. No entanto o estado de resistência nula podia ser destruído se o material fosse sujeito a um campo magnético suficientemente grande ou se a corrente que passava no material supercondutor excedesse o seu valor crítico[1].

Em 1933 Walther Meissner e Robert Ochsenfeld realizaram experiências para estudar em detalhe o que acontecia ao campo magnético, perto de um supercondutor quando este era arrefecido. Repararam então que, o campo magnético não ficava "preso" dentro do material mas era expelido dele. Este efeito de expulsão forçada do campo magnético de um supercondutor, conhecido como efeito Meissner é tão forte que faz com que os

magnetos levitem sob a influência de um material supercondutor[1].

No ano seguinte, em 1934, Cornelis Gorter e Hendrik Casimir formularam a teoria dos dois fluídos. Supuseram que um supercondutor continha eletrões normais, que não eram supercondutores, e supereletrões, estes tendo características supercondutoras. Esta ideia consiste que à medida que vamos arrefecendo um supercondutor, a quantidade de supereletrões aumenta. O efeito contrário acontecia quando este era aquecido, consequentemente diminuindo a quantidade de supereletrões. Também em 1935 os irmãos Fritz Wolfgang e Heinz London com base na teoria dos dois fluídos, formularam um conjunto de equações, conhecidas por equações de London, a partir das quais é possível explicar o efeito Meissner[1].

Em 1950, Vitaly Ginzburg e Lev Landau publicaram uma nova teoria, baseada nas equações de London e na mecânica quântica, para descrever o fenómeno da supercondutividade[1].

Alexei Abrikosov, no início da década de 50, ficou preocupado pois após testes experimentais, os resultados não batiam certos com a teoria. Percebeu que esta teoria necessitava de ser estendida a uma área em que Ginzburg e Landau não imaginavam que podia ser alcançada. Abrikosov comprova então teoricamente a existência de vórtices nos supercondutores. No seu estudo ainda é previsto a existência de um novo tipo de supercondutores, denominados por supercondutores de tipo II. Foi possível também confirmar um estado misto, em que no mesmo material pode coincidir a fase normal com a fase supercondutora. Foi esta característica que permitiu assim diferenciar as duas classes de supercondutores (tipo I e tipo II)[1].

A primeira compreensão teórica amplamente aceite relativamente a supercondutividade foi avançada em 1957 pelos físicos americanos John Bardeen, Leon Cooper e John Schrieffer. A sua explicação da supercondutividade ficou conhecida como teoria BCS, derivando da primeira letra do último nome de cada físico. Esta teoria apresenta os pares de Cooper ou supereletrões, que funcionam como portadores de carga nos materiais supercondutores[1].

Em 1986, Georg Bednorz e Alex Müller, investigadores na IBM na Suíça criaram um composto cerâmico que atingiu o seu estado supercondutor à temperatura mais alta até a data, 30 K[1].

### **2.1.2 Propriedades dos Supercondutores**

Para uma melhor compreensão da supercondutividade é necessário descrever algumas propriedades macroscópicas dos supercondutores. Sendo o fenómeno da supercondutividade um estado da matéria, um material, no estado supercondutor, apresenta várias propriedades elétricas e magnéticas. Nesta secção irão ser abordadas as características mais importantes que se observam neste tipo de materiais, como a resistividade nula (propriedade elétrica) e o diamagnetismo perfeito, conhecido como efeito Meissner (propriedade magnética). A transição entre a fase normal e a fase supercondutora determina

o tipo de supercondutor, podendo este ser do tipo I ou do tipo II.

### 2.1.2.1 Resistividade Nula

Num material supercondutor, abaixo de uma temperatura crítica, ocorre uma queda abrupta da resistividade do material para zero (figura 2.4). Este fenómeno é de difícil compreensão, tendo em conta que era expectável existir uma resistência originada pelas falhas e vibrações dos átomos quando o fluxo de eletrões atravessa o material, facto que nos supercondutores não evita a anulação da resistividade. Ainda assim, isto só é válido para correntes DC, já para as correntes AC, o material apresenta campo elétrico e consequentemente uma resistividade não nula, apesar de serem valores residuais quando comparados com os valores presentes em condutores convencionais.

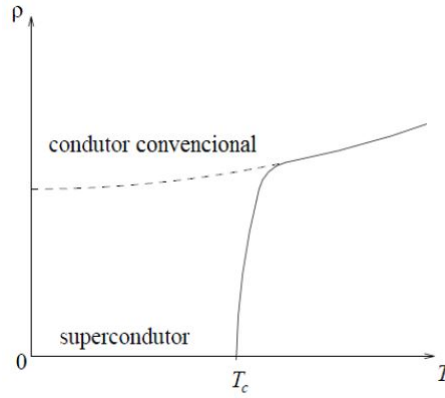


Figura 2.4: Resistividade vs temperatura em supercondutores e condutores convencionais[3]

No caso de uma corrente DC, não existe campo elétrico  $E$  no material, logo a densidade de corrente normal  $J_n$  é nula, ou seja:

$$J_n = \sigma_n E = 0 \quad (2.1)$$

Pelo que não existe condução por parte dos eletrões normais. Uma vez que a força eletrostática  $F$  também é nula,

$$F = -eE = m_e \frac{\partial v}{\partial t} = 0 \quad (2.2)$$

Sendo  $e$  a carga do eletrão e  $m_e$  a sua massa, apenas os supereletrões são responsáveis pela condução, à velocidade  $v$ , que é constante no tempo. Assim, num regime de corrente continua, a resistividade do material pode ser considerada nula.

Os limites da resistividade podem ser obtidos mais rigorosamente não pela sua medida direta, condicionada pela resolução dos aparelhos de medida, mas sim pela medição da densidade de fluxo  $B$  causada por correntes persistentes em anéis supercondutores. A resistividade nula implicaria que a corrente permanecesse no anel indefinidamente [3].



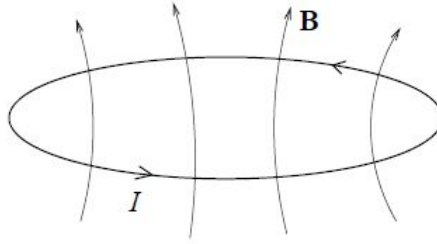


Figura 2.5: Anel supercondutor[3]

Em corrente alternada (AC) existe campo elétrico, fazendo com que existam correntes que obedecem à Lei de Ohm originando perdas de Joule, ou seja, a resistividade do material passar a ser diferente de zero.

### 2.1.2.2 Efeito Meissner

O Efeito Meissner (figura 2.6), a par da resistividade nula, é uma das propriedades mais importantes dos materiais supercondutores. Estes materiais apenas não evitam a penetração de um campo magnético mas também conseguem expulsá-lo ativamente do seu interior. A este efeito também se pode denominar diamagnetismo perfeito, o material, no seu estado supercondutor, comporta-se como um diamagneto perfeito. No interior de um supercondutor ter-se-á a seguinte densidade de fluxo:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) \quad (2.3)$$

Como a densidade de fluxo no interior do supercondutor é nula,  $B=0$ , resulta que a magnetização  $M$  se relaciona com o campo aplicado  $H$  da seguinte forma:

$$\vec{M} = -\vec{H} \quad (2.4)$$

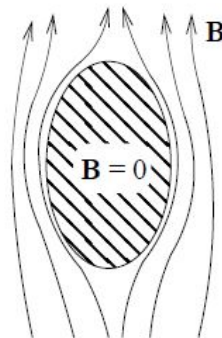


Figura 2.6: Efeito Meissner[3]

De notar que, que um supercondutor não apresenta o mesmo comportamento que um condutor perfeito. Enquanto no interior de um supercondutor não existe fluxo, pois  $B = 0$ , no interior de um condutor perfeito, existe fluxo mas este não varia, ou seja,  $\frac{\partial B}{\partial x} = 0$ .

### 2.1.3 Limites da Supercondutividade

O fenómeno da supercondutividade consiste num estado da matéria que depende de três grandezas físicas, a densidade de corrente  $J$ , o campo magnético  $H$ , e a temperatura  $T$ . A supercondutividade desaparece ao ultrapassar o valor crítico de qualquer uma destas grandezas. Podemos dizer então que, o estado supercondutor está confinado a um espaço que tenha como dimensões as grandezas referidas anteriormente.

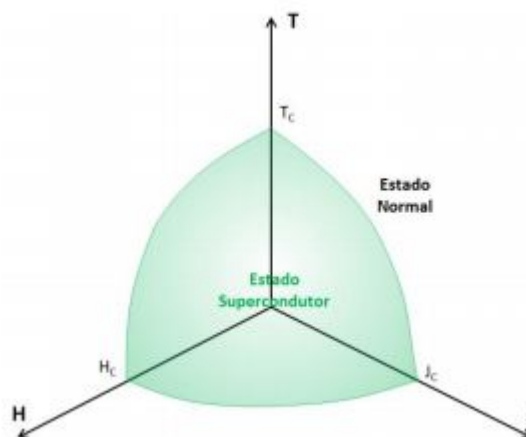


Figura 2.7: Espaço de estados de um supercondutor

Pode-se concluir que só existe supercondutividade nos materiais, caso não seja ultrapassado o valor crítico de uma das grandezas  $T$ ,  $J$  ou  $H$ .

### 2.1.4 Classificação dos Supercondutores

Antes de 1960, não existiam aplicações práticas para a utilização de supercondutores, a corrente máxima que suportavam era insuficiente para tal. A sua utilização apenas começou a ser viável, quando uma nova classe de supercondutores foi descoberta. As duas classes existentes podem ser, distinguidas como tipo I e tipo II ou então conhecidos também por supercondutores macios ou supercondutores duros. Estes dois tipos de supercondutores, diferem na forma de transição entre o estado supercondutor e o estado normal. Hoje em dia, os mais utilizados são os supercondutores de alta temperatura (SAT), que se inserem na classe II.

#### 2.1.4.1 Supercondutores do Tipo I

Estes materiais são essencialmente metais e metaloides, que mostram condutividade à temperatura ambiente. Neste tipo de supercondutores, a corrente crítica é apenas consequência do campo magnético crítico  $H_c$ . Como nestes materiais, o campo magnético crítico  $H_c$  é bastante fraco, a sua densidade de corrente crítica  $J_c$  vai ser igualmente baixa[4]. Este tipo de supercondutor é caracterizado por ter dois estados magnéticos:

o estado Meissner e o estado normal (figura 2.8). Quando o material se encontra no estado supercondutor, este apresenta, de forma praticamente perfeita, o efeito de Meissner. Contudo para campos externos superiores ao valor crítico  $H_c$ , o material perde as suas propriedades supercondutoras, transitando para o estado normal.

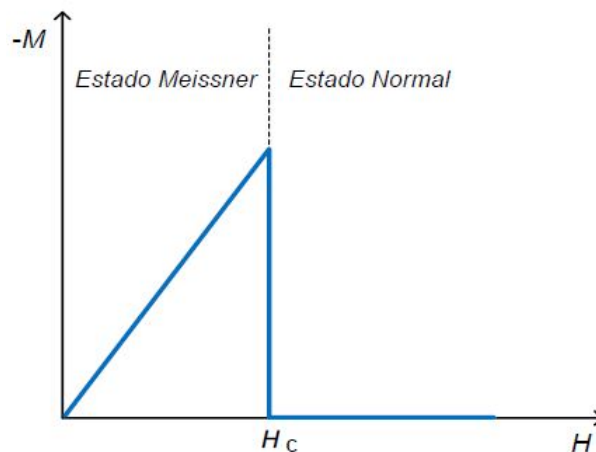


Figura 2.8: Curva de Magnetização dos supercondutores Tipo I

#### 2.1.4.2 Supercondutores do Tipo II

Os supercondutores de tipo II, também designados por supercondutores duros, são essencialmente ligas metálicas e são relativamente diferentes dos supercondutores do tipo I, pois o seu comportamento face a campos magnéticos externos é bastante diferente, principalmente no que diz respeito à fase de transição entre os estados normal e supercondutor. A principal diferença encontra-se na transição entre estes dois estados, onde passa a existir mais um estado, o estado misto, em que se permite a coexistência do estado supercondutor e do estado normal do material.

Tal como nos supercondutores do tipo I, quando expostos a campos externos fracos, estes também apresentam o efeito Meissner, repelindo as linhas de fluxo magnético do seu interior até um determinado campo crítico  $H_{c1}$ . Acima deste campo, ocorre o fenómeno de penetração de linhas de fluxo no interior do material, começando a coexistir o estado normal com o estado supercondutor, ou seja, o estado misto (figura 2.9).

Se esta penetração de linhas de fluxo continuar a aumentar, até atingir um determinado campo crítico  $H_{c2}$ , o material perde praticamente todas as suas propriedades supercondutoras, tornando-se uma material dito normal[4].

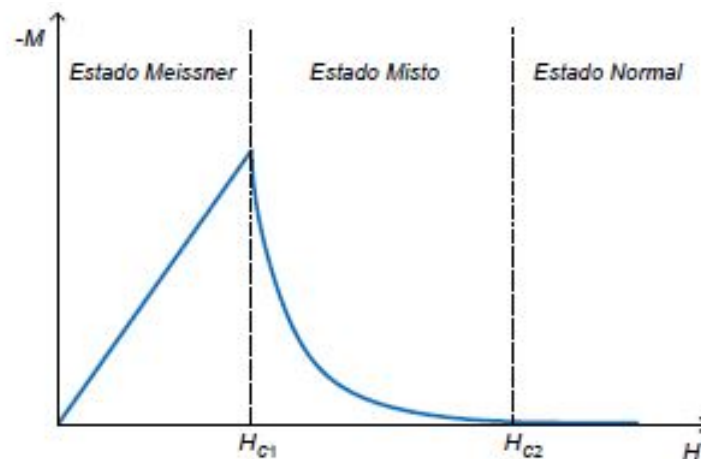


Figura 2.9: Curva de Magnetização dos supercondutores Tipo II

## 2.2 Supercondutores de Alta Temperatura

Existiriam muitos mais usos práticos para a supercondutividade se não fosse os elevados custos de arrefecimento dos materiais. No entanto o surgimento dos supercondutores de alta temperatura permitiu a redução dos custos de refrigeração. Por exemplo, o oxigénio, no estado líquido, encontra-se à temperatura de 90K e o azoto, nesse mesmo estado, encontra-se a 77K. Como os custos de liquefação deste tipo de gases é bastante menos dispendioso comparativamente ao do hélio, abriu-se uma oportunidade para o desenvolvimento de aplicações viáveis, baseadas em supercondutores de alta temperatura[4].

Os supercondutores de alta temperatura mais utilizados em aplicações de potência são os materiais do tipo cerâmico, constituídos a base de óxidos de cobre, que permitem manter a supercondutividade a temperaturas relativamente elevadas, aproximadamente 100 K. Por exemplo, o YBCO pode conduzir até aos 92 K. Existem também , o TBCCO e o HBCCO, embora estes não sejam produzidos em tão larga escala como o YBCO.

Tabela 2.1: Temperatura crítica dos SAT de maior aplicação em dispositivos de potência

Designação	Fórmula	Temperatura Crítica (K)
YBCO	$YBa_2Cu_3O_7$	92
BSCCO	$(Bi,Pb)_2Sr_2Ca_2Cu_3O_x$	105
TBCCO	$Tl_1Ba_2Ca_2Cu_3O_v$	115
HBCCO	$Hg_1Ba_2Ca_2Cu_3O_y$	135

### 2.2.1 Modelização

Apesar de não existir uma teoria que descreva o comportamento microscópico dos supercondutores de alta temperatura, nas últimas décadas têm surgido vários modelos

empíricos que permitem descrever o comportamento dos materiais supercondutores do tipo II, e consequentemente, dos SAT.

#### 2.2.1.1 Modelo de Bean

Dos principais modelos, destaca-se o modelo de Bean, que descreve a magnetização dos supercondutores do tipo II, num campo magnético externo não estacionário. Este modelo, propõe que o campo magnético penetra o material de forma linear, assumindo assim que a densidade de corrente crítica no mesmo é constante[5].

Este modelo tem sido utilizado para explicar resultados experimentais e tem tido concordância com esses resultados, apesar de partir de pressupostos que não correspondem à realidade, assumindo que a corrente no supercondutor assume apenas dois valores, zero ou o valor crítico. O modelo de Bean revela também bons resultados na determinação de perdas regime em alternado nos supercondutores.

#### 2.2.1.2 Lei da Potência E-J

Ao contrário do modelo de Bean, onde se consideram que a corrente presente no supercondutor apenas podem tomar o valor nulo ou o valor crítico, na lei da potência E-J, a corrente, caso exista, não apresenta, em todo o caso, o seu valor crítico.

Esta lei pode ser definida da seguinte forma[6]:

$$E = E_c \left( \frac{J}{J_c} \right)^n \quad (2.5)$$

onde  $E_c$ , representa o campo elétrico crítico,  $n$  é um fator de forma no qual  $n = 1$  corresponde à aplicação da lei de Ohm no estado misto de um supercondutor do tipo II e com  $n \rightarrow \infty$  é equivalente ao modelo de Bean, enunciado anteriormente.

#### 2.2.2 Tecnologia dos Materiais

Os supercondutores de alta temperatura existem em vários formatos. Comercialmente encontram-se disponíveis sob a forma de blocos maciços ou fitas, dependendo da aplicação para qual são dimensionados. Os SAT difundidos no mercado são em BSCCO (1G) ou YBCO (2G).

##### 2.2.2.1 Supercondutores de Primeira Geração (1G)

Os materiais SAT mais utilizados inicialmente eram baseados em bismuto, especificamente Bi-2212 e Bi-2223. Estes são denominados supercondutores de primeira geração e tiveram um papel fundamental na demonstração da utilidade dos dispositivos SAT de potência, como cabos de transporte de energia, transformadores, limitadores de corrente, motores e geradores[7].

Os benefícios de desempenho destes dispositivos SAT, em comparação com dispositivos não condutores convencionais, têm sido demonstrados para todas as aplicações referidas.

### 2.2.2.2 Supercondutores de Segunda Geração (2G)

Mais recentemente, foram desenvolvidos SAT à base de terras-raras ((T-R)BCO), como é o exemplo do ítrio, o samário e o gadolínio. Estes condutores 2G oferecem mais benefícios comparativamente aos seus precursores (1G), nomeadamente no desempenho, conseguindo operar a temperaturas superiores e em campos magnéticos mais intensos.

O processo produtivo dos supercondutores de segunda geração consiste na deposição orientada de uma multicamada sobre um substrato. O composto geralmente usado na camada supercondutora é o YBCO.

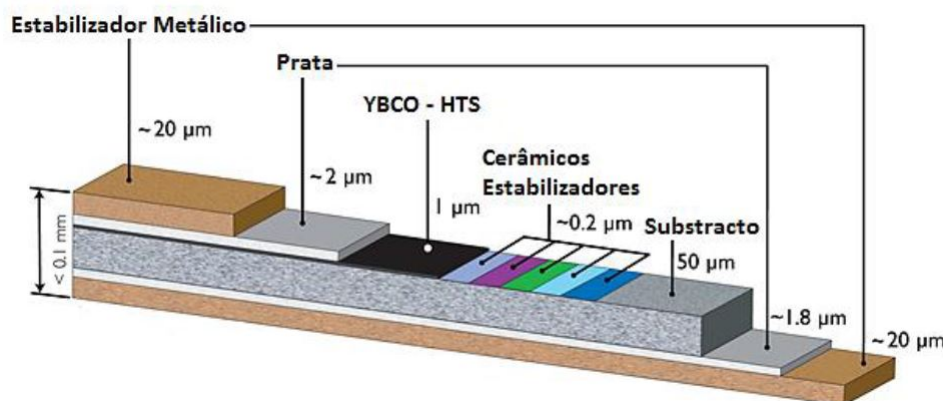


Figura 2.10: Descrição do supercondutor 2G da Superpower. Adaptado de <http://www.superpower-inc.com/content/2g-hts-wire>, último acesso dia 18 de Março de 2016

## 2.3 Limitadores de Corrente

Correntes de falha num sistema elétrico são inevitáveis. Devido a estas situações, que afetam a estabilidade da rede elétrica e dos danos resultantes que ocorrem nas imediações da zona onde sucede a falha, as correntes provenientes das fontes e que fluem para o local da falha originam tensões bastante elevadas nos equipamentos, tais como cabos, linhas áreas ou transformadores[8].

Com crescimento contínuo na área da produção da energia elétrica, as correntes de curto-circuito podem atingir ou até ultrapassar o limite permitido pela rede. Sendo assim, como as redes elétricas estão sujeitas a sofrerem danos devido a estas correntes, torna-se imprescindível munir a rede com capacidade de proteção, de modo a garantir a segurança e a robustez aos sistemas de energia. Esta proteção, que é tanto mais difícil quanto mais

elevado for a corrente, no entanto pode ser alcançada através da instalação de limitadores de corrente, permitindo assim um maior nível de fiabilidade nas redes de nova geração.

Essencialmente, um limitador de corrente deve possuir as seguintes características[9]:

- Impedância suficientemente baixa em funcionamento normal.
- Impedância suficientemente elevada em situações de falha.
- Rápida deteção de falha.
- Rápida resposta a uma falha, em menos de um ciclo de onda.
- Transição rápida para o estado de funcionamento normal após a eliminação da falha, em menos de meio ciclo.
- Capacidade de resposta aquando da ocorrência de duas falhas em períodos de 15 segundos.
- Baixos requisitos de manutenção.
- Compatibilidade com sistemas de proteção já existentes.

### 2.3.1 Limitadores de Corrente Convencionais

As formas mais comuns para a redução dos níveis de corrente de curto-circuito são[8]:

- Construção de novas subestações.

Permite corrigir problemas e também proporciona o futuro crescimento da rede elétrica. No entanto é bastante dispendiosa e morosa.

- Construção ou separação de barramentos.

É uma solução não tão dispendiosa como a construção de novas subestações, mas no entanto influencia a interconectividade da rede. Permite reduzir de forma eficiente o número de fontes que podem alimentar e contribuir para a falha. .

- Transformadores de elevada impedância.

Dispositivos fáceis de instalar e sem necessidade de manutenção regular. Conseguem limitar efetivamente a corrente, aquando de uma falha. No entanto, em funcionamento normal, a impedância não é desprezável, observando-se perdas associadas.

- Fusíveis de elevada tensão.

Esta solução consiste em dispor os fusíveis em série com a linha. Assim, quando surge uma falha, a corrente na linha é descontinuada. Porém, até que se proceda a substituição do equipamento, o circuito mantém-se em aberto.

- Limitadores de corrente pirotécnicos ou limitadores  $I_s$ .

A alternativa com melhor desempenho. Esta topologia consiste em duas câmaras em paralelo, sendo que, uma delas contém o condutor, oferecendo um caminho preferencial para a corrente, enquanto na outra se encontra um fusível (figura 2.11). O seu modo de operação baseia-se num sensor de corrente que interrompe a passagem da mesma pelo condutor preferencial quando é detectado um aumento da mesma. Logo, a corrente passa a circular pelo caminho do fusível, que ao fundir instiga o final do CC em menos de um quarto de ciclo da onda.

- Reatâncias de núcleo de ar.

Outra alternativa para a limitação de corrente é a reatância de núcleo de ar, como se ilustra na figura 2.11. Este dispositivo aciona-se automaticamente sem necessidade de sensores e limita a corrente de falha devido à queda de tensão aos seus terminais. A impedância da reatância depende da corrente que o atravessa, apresentado um comportamento linear. Estes dispositivos não necessitam de manutenção e tem pequeno impacto ambiental. Porém em funcionamento normal, os reatores de núcleo de ar apresentam perdas.



(a) Limitador  $I_s$  da ABB



(b) Reatância de núcleo de ar da Alstom

Figura 2.11: Exemplos de Limitadores de Corrente Convencionais

### 2.3.2 Limitadores de Corrente Supercondutores

Graças ao seu tempo de resposta, quase instantâneo, os LCS têm sido apontados como uma das principais aplicações na área da energia, permitindo evitar a sobrecarga prejudicial dos elementos da rede. Geralmente são colocados em série com os disjuntores, no caso de os defeitos não serem temporários, é necessário o corte do fornecimento de energia. Os primeiros LCS foram construídos com supercondutores de baixa temperatura aproximando-se dos requisitos necessários para a sua aplicação. No entanto, o seu sucesso comercial estaria longe, devido às baixas temperaturas que seria necessário manter



o supercondutor. Com o surgimento dos SAT, a situação alterou-se. Com esta descoberta, era agora muito mais acessível manter o supercondutor à temperatura desejada, onde os sistemas de criogenia são muito mais eficientes.

### 2.3.2.1 Classificação dos Limitadores de Corrente Supercondutores

Os LCS podem ser englobados em três categorias principais, consoante o tipo de ligação que estabelecem com a linha. Caso o LCS se encontre em série com a linha, é designado por limitador de tipologia resistiva; caso a ligação estabelecida entre a linha e o material condutor seja magnética, então a tipologia é classificada de indutiva; por ultimo, se a ligação é criada mediante a utilização de uma ponte retificadora, o limitador é classificado como retificador. Estes três grupos, no entanto, dividem-se em subgrupos, conforme o aproveitamento ou não da transição entre o estado supercondutor e o estado normal, ou o recurso a núcleos de ferro, entre outros fatores[10].

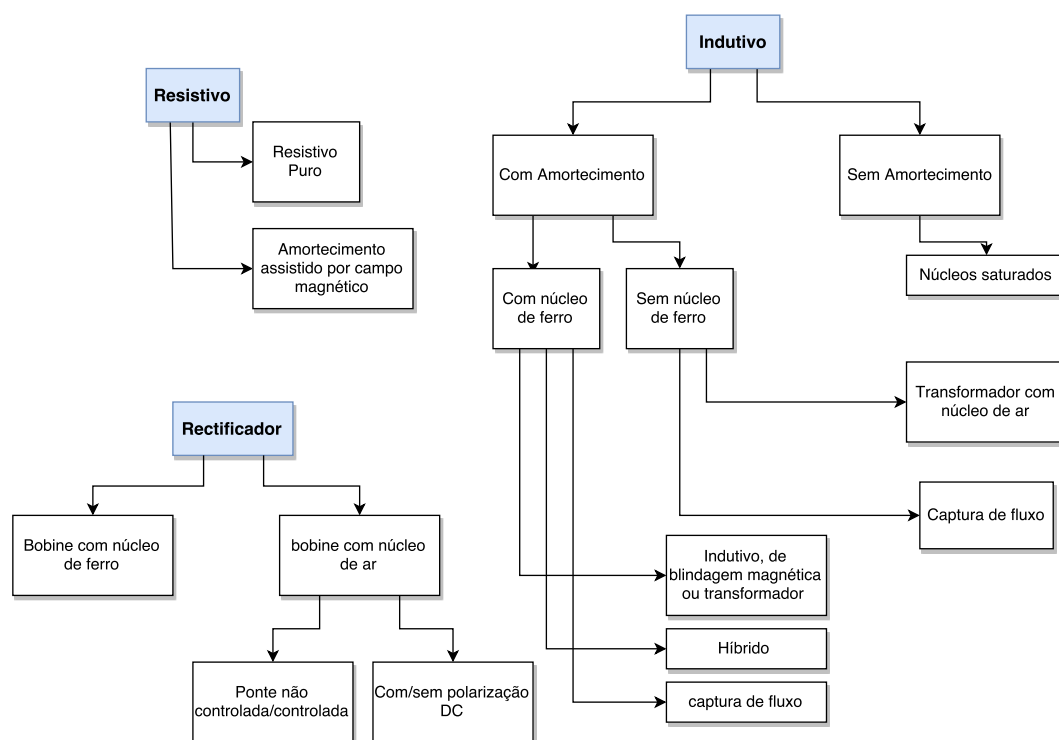


Figura 2.12: Classificação dos limitadores de corrente supercondutores[10].

Relativamente ao número de fases que constituem os LCS, estes pode ser classificados como monofásicos ou trifásicos.

Este tipo de limitadores pode ter aplicações em várias áreas, ao nível de geração, transporte e distribuição. As gamas de tensão para a aplicação dos LCS são essencialmente a média tensão<sup>1</sup>(MT) e a alta tensão<sup>2</sup>(AT). No entanto, em alguns casos, também se usam

<sup>1</sup>Tensão entre fases cujo valor eficaz é superior a 1 kV e igual ou inferior a 45 kV

<sup>2</sup>tensão entre as fases cujo o valor eficaz é superior a 45 kV e igual ou inferior a 110 kV

em aplicações de baixa tensão<sup>3</sup>(BT).

### 2.3.2.2 Limitador de Corrente Supercondutor Resistivo

Neste tipo de limitadores, o supercondutor é um condutor elétrico, ou seja, o material supercondutor está ligado em série com o condutor convencional a ser protegido, como é ilustrado na figura 2.13. Em regime normal, o SAT encontra-se no seu estado supercondutor. Quando este entra no regime de falha o supercondutor torna-se altamente resistivo, dissipando a energia em forma de calor. Durante esta transição existe um rápido aumento de temperatura devido a perdas de Joule e um aumento da queda de tensão nos seus terminais.

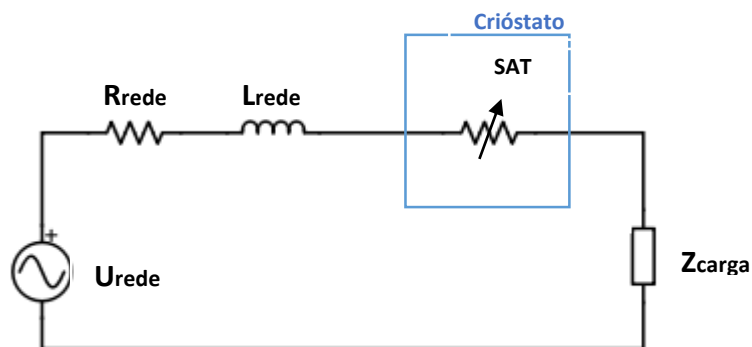


Figura 2.13: Circuito equivalente de um LCS resistivo

### 2.3.2.3 Limitador de Corrente Supercondutor Rectificador

Este limitador tem como principal conceito o uso da eletrônica de potência. A sua tecnologia é baseada numa ponte retificadora, no qual se encontra uma bobina supercondutora com núcleo de ar e uma fonte de tensão DC (figura 2.14). Em regime normal, a corrente é ajustada para que a ponte conduza sempre e também exista corrente na bobina supercondutora.

Em regime de falha, um par de díodos param o seu funcionamento durante o meio período positivo do ciclo e o outro par de díodos não funciona no meio do período negativo do ciclo. No supercondutor passam componentes AC e passam a existir as perdas AC na bobine. O aumento da impedância cria uma queda de tensão aos seus terminais que limitará a corrente.

---

<sup>3</sup>Tensão entre fases cujo o valor eficaz é igual ou inferior 1 kV

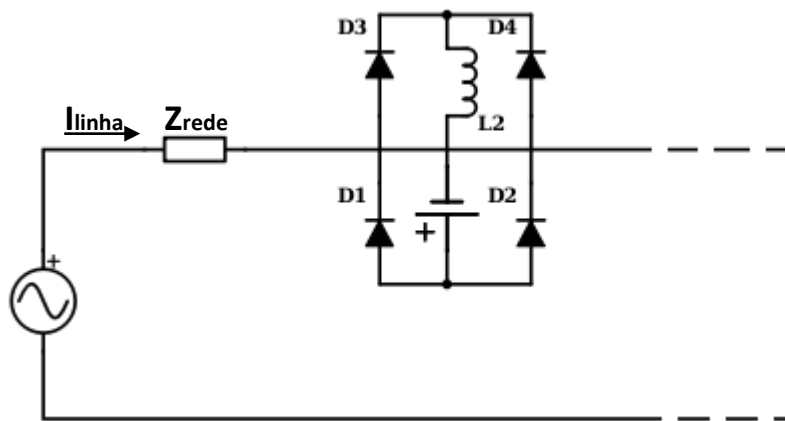


Figura 2.14: Circuito equivalente de um LCS Rectificador

#### 2.3.2.4 Limitador de Corrente Supercondutor Indutivo do tipo transformador

Esta última topologia, limitador de Corrente Supercondutor indutivo do tipo transformador foi o utilizado nos ensaios laboratoriais. O princípio de funcionamento desta topologia baseia-se no funcionamento de um transformador, onde temos o primário composto por um condutor de cobre e um enrolamento secundário em que o seu material é o supercondutor. O primário encontra-se em série com a linha que necessita de ser protegida, enquanto o elemento supercondutor encontra-se ligado em curto-circuito (figura 2.15). Estes limitadores também se baseiam no princípio do diamagnetismo perfeito do supercondutor, isto é, quando no estado supercondutor, o campo magnético é expelido pelo material com essas propriedades[11].

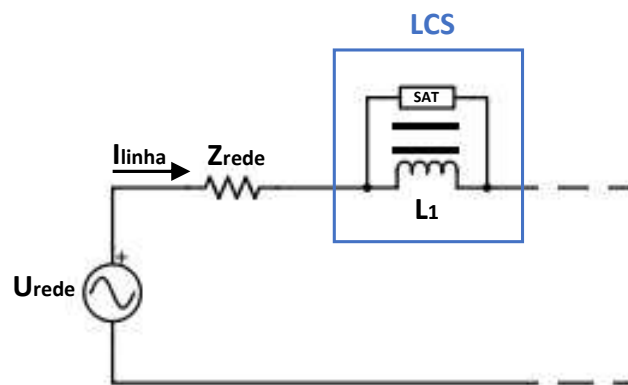


Figura 2.15: Esquema elétrico do LCS indutivo do tipo transformador

Os limitadores de corrente supercondutores do tipo indutivo são caracterizados por terem uma impedância bastante baixa em condições de funcionamento normal, uma vez que a impedância nula do supercondutor do secundário é refletida no primário. Sobre condições de falha, a impedância originada no secundário é transmitida para o circuito, limitando assim as correntes de falha[12].

Relativamente a vantagens e desvantagens do LCS indutivo, numa perspetiva de aplicações de potência, e em comparação com as outras duas categorias de limitadores de corrente supercondutores, podem destacar-se as seguintes[10]:

- **Vantagens**

- a) Como a ligação com a linha é realizada magneticamente, as pontas terminais de corrente são dispensáveis, exceto nos casos dos núcleos saturados.
- b) Possibilidade de ajustar a impedância de limitação através do número de espiras do(s) primário(s).
- c) Maior facilidade em suprimir os pontos quentes, e ausência de questões de integridade física dos materiais, dado que estes não estão ligados diretamente à linha de energia.
- d) Na topologia sem amortecimento com núcleos saturados, não ocorrem perdas AC, e não existe necessidade do material recuperar o estado supercondutor após a resolução da falha, pois encontra-se sempre neste estado.

- **Desvantagens**

- a) Devido aos núcleos ferromagnéticos, o peso e o volume são consideráveis.
- b) Não funcionam em redes DC.
- c) Quando são utilizados supercondutores maciços, estes dispositivos são difíceis de escalar para redes de alta tensão, devido à dificuldade de produzir materiais SAT homogêneos nas dimensões necessárias.

## 2.4 Fenómeno de "Quench"

A instabilidade térmica de um material supercondutor, que consequentemente resulta na perda de supercondutividade do mesmo, é essencial para compreender o fenómeno de *quench*. Este ocorre principalmente quando o valor crítico de campo magnético, temperatura ou densidade de corrente é ultrapassado sem ter a capacidade de o recuperar. Basicamente, este fenómeno acontece devido a um rápido aquecimento de Joule num determinado ponto do material, levando a um aumento da temperatura das regiões próximas, que transitam assim para o estado normal. Este efeito alastra-se então pelo resto do material supercondutor, comprometendo o seu funcionamento.

Devido a esta perda de propriedades do material em causa, existe dissipação de energia sob a forma de calor, e consequente evaporação do líquido criogénico caso este exista no sistema. Verifica-se assim uma queda da corrente que leva a picos de tensão indutiva. Este aquecimento localizado bem como as elevadas tensões podem danificar componentes do material, ou em casos extremos, danos permanentes e irreparáveis.

Devido a todas estas razões, os dispositivos de segurança e os sistemas de detecção face a este fenómeno ganham uma importância acentuada. No caso de um *quench* ocorrer, é normalmente muito complicado, se não impossível, permitir a operação a corrente constante sem que se verifiquem temperaturas fora do normal sobre o supercondutor. A corrente tem então de ser reduzida a zero e a energia armazenada eliminada. Para que tal aconteça é indispensável uma detecção rápida e fiável do problema.

### 2.4.1 Estado da Arte

Hoje em dia existem diversos sistemas de detecção de *quench*, sendo que os mais comuns derivam essencialmente de técnicas baseadas em tensão, temperatura ou potência. No entanto, este tipo de técnicas apresenta alguns problemas que vão ser aprofundados nas secções seguintes, surgindo assim a necessidade de desenvolver novos métodos que possam realizar a detecção de *quench* de uma maneira mais eficaz. O propósito desta dissertação é realizar a detecção de *quench* com a ajuda de sondas de Hall, de maneira a que seja uma técnica mais eficaz relativamente às que existem atualmente.

### 2.4.2 Técnicas de Detecção de "Quench"

Serão de seguida apresentados os métodos base de detecção de *quench*, sendo que esta apresentação é enquadrada num contexto de aplicação prática. Irão ser abordados alguns exemplos já implementados.

#### 2.4.2.1 Tensão

A técnica de detecção através de tensão geralmente é utilizada com o objetivo de identificar regiões resistivas em magnetos supercondutores. Para método tradicional de detecção de *quench* através de tensão, o magneto apresenta dois pares de tensão adjacentes. As tensões referidas "atravessam" as duas metades do magneto, sendo posteriormente comparadas e equilibradas (ver figura 2.16). Quando surge uma zona normal do magneto em caso de *quench*, desequilibra as tensões referidas, podendo assim ser detectado[13].

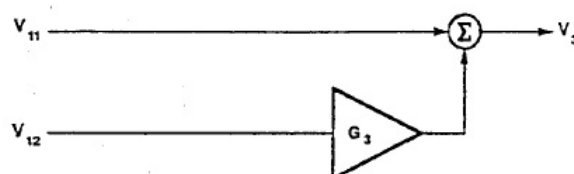


Figura 2.16: Método de detecção tradicional de *quench* utilizando tensão[13].

No entanto, este método apenas foi bem sucedido para enrolamentos individuais, sendo que foi mostrado que não é adequado para quando existem múltiplos enrolamentos. Isto acontece devido às tensões indutivas existentes que podem fazer disparar o sistema de proteção erradamente[13].

Existem sistemas que conseguem eliminar a sensibilidade a este tipo de sinais não-resistivos, como o circuito de eliminação de Gauss[13].

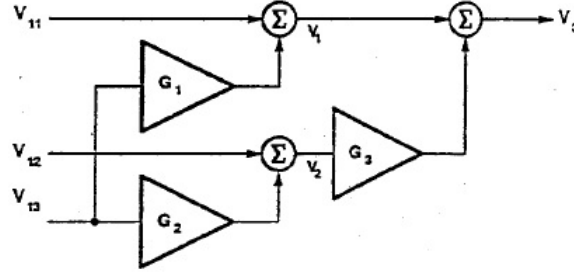


Figura 2.17: Circuito referente ao método de eliminação Gaussiana[13].

No entanto, mesmo com as melhorias que o método de detecção gaussiana trouxe a este tipo de circuitos, ainda apresenta algumas limitações. As tensões que normalmente estão associadas ao fenómeno de *quench* podem ser extremamente reduzidas, que em combinação com o ruído inerente a este tipo de leituras torna este método quase inviável.

#### 2.4.2.2 Potência Ativa

Os sistemas elétricos mais convencionais de detecção de *quench* são bastante vulneráveis a ruído eletromagnético, que pode causar um mau reconhecimento do fenómeno *quench*. Analisando o problema anterior, os métodos que apresentam melhores resultados são aqueles que recorrem a leituras de potência ativa parcial (figura 2.18)[14].

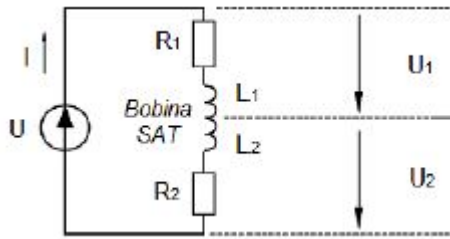


Figura 2.18: Circuito base de um método de detecção de potência ativa parcial, adaptado de[15].

Na figura anterior,  $L_1$  e  $L_2$  representam as indutâncias do magneto,  $R_1$  e  $R_2$  as resistências da bobina, enquanto as tensões  $U_1$  e  $U_2$  e a corrente  $I$  serão os sinais de entrada do sistema de detecção, na ocorrência de um *quench*.

A potência ativa é assim dada por[15]:

$$P = (U_1 - U_2)I = (R_1 - R_2)I^2 \quad (2.6)$$

No estado supercondutor,  $R_1$  e  $R_2$  são zero, logo  $P$  também assume o valor zero. Assumindo a existência de um *quench*,  $P$  deixa de ser nula, obtendo-se a seguinte expressão[15]:

$$p(t) = \frac{(R_1 - R_2)}{2} I^2 - \frac{(R_1 - R_2)}{2} I^2 \cos 2\omega t + \text{ruído} \quad (2.7)$$

O primeiro termo de (2.7) corresponde à componente DC, o segundo termo à componente AC e o último termo o ruído. É esta componente de ruído, que pode levar a um mau reconhecimento do *quench*. Com o intuito de reduzir o ruído, é utilizado então um filtro passa-baixo. O filtro corta o ruído e a componente AC do sinal, no entanto deixa passar a componente DC, denominada potência parcial. É a partir desta que em comparação com um certo valor de referência, determina a existência ou não de um *quench*[14].

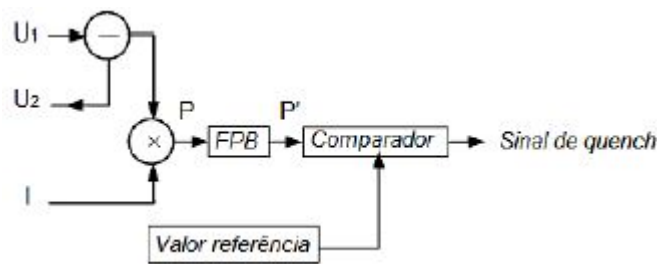


Figura 2.19: Diagrama esquemático do sistema aperfeiçoado. Adaptado de[14][15].

Alguns métodos ainda recorrem a amplificadores de sinal, inversores monofásicos PWM<sup>4</sup> para um melhor controlo da frequência e amplitude da corrente, e ainda a bobinas de suavização para reduzir o efeito de *Ripple*<sup>5</sup> sentido na bobina SAT.

### 2.4.2.3 Temperatura

As primeiras tentativas, de métodos de deteção de *quench*, através da utilização de sensores de temperatura convencionais revelaram-se inúteis, já que estes apresentavam limitações acentuadas. Os termopares ou sensores RTD (*Resistance Temperature Detectors*) não funcionam com eficácia às temperaturas associadas ao *quench* e também apresentam um desfasamento temporal bastante significativo. Além destes fatores, estes também não podiam ser inseridos quer diretamente dentro dos enrolamentos, quer no interior dos cabos supercondutores[16].

Em contrapartida, os sensores de temperatura em fibra ótica apresentavam algumas características vantajosas. São dispositivos de pequenas dimensões ( $\leq 50\mu m$ ), e com baixos níveis de sensibilidade a pressões e campos magnéticos pulsantes[16].

O princípio básico deste tipo de sensores consiste na medição do comprimento do percurso óptico, tirando proveito da dependência que o índice de refração tem em relação à temperatura[16].

<sup>4</sup>Acrónimo de *Pulse-With Modulation*, Modulação por Largura de Pulso na terminologia portuguesa.

<sup>5</sup>Oscilações verificadas na corrente da bobina SAT

De entre os diversos sensores de fibra óptica existentes, os interferómetros<sup>6</sup> são aqueles que tem o maior potencial para a detecção do fenómeno de *quench*. São os que apresentam maior sensibilidade a altas temperaturas do que a temperaturas na gama dos 4-10K, tendo a capacidade de rejeitar as ligeiras oscilações de temperatura, reduzindo número de falsos positivos[16].

#### 2.4.2.4 Digitais

São sistemas de detecção de *quench* bastante viáveis, pois oferecem bons níveis de flexibilidade, com a capacidade de detetar tensões resistivas de uma forma eficaz e com atrasos mínimos. Existem inúmeros sistemas implementados no mercado, sendo que de seguida serão descritos dois sistemas de detecção digital em particular.

Esta primeira técnica de detecção digital, ou sistema DQD<sup>7</sup>, tem como base a aplicação de algoritmos de processamento de sinais digitais, utilizando um processador Motorola PowerPC VME. Este sistema encontra-se dividido em duas componentes principais, o *hardware* lógico e o sistema de disparo de eventos. O primeiro é responsável pelo fornecimento e descarga de energia do sistema enquanto o segundo determina o início da proteção do magneto com base em valores *quench* de referência definidos à priori[17].

São então obtidos os valores de tensão (valores analógicos) provenientes do magneto supercondutor. Estes passam por um filtro *anti-aliasing*<sup>8</sup> e posteriormente um dispositivo ADC<sup>9</sup> que os converte para digitais. Os sinais digitais por fim são encaminhados para uma unidade central de processamento (UCP)[17].

De notar que a performance do sistema DQD está dependente da eficácia mostrada pelos seus elementos constituintes. Assim, a rapidez de processamento da UCP, bem como as respostas do filtro *anti-aliasing* e do conversor ADC, são factores essenciais para o sucesso desta técnica de detecção digital. O sistema DQD prima pela sua flexibilidade, adaptando-se com elevado grau de facilidade a diversas aplicações no âmbito do estudo de supercondutores, bastando para tal, adaptar os valores de referência à aplicação em questão[17].

O segundo sistema em questão consiste num DQD para um SMES<sup>10</sup>. Para garantir a segurança do magneto, a detecção do *quench* deve ser rápida e fiável. Portanto, à componente digital de detecção de *quench*, é adicionado um componente analógico para o mesmo efeito. O *hardware* de detecção é constituído por um circuito de sensores para obter os valores de tensão das secções do magneto, um filtro *anti-aliasing*, um amplificador de sinal, uma placa de aquisição de dados, mais especificamente a NI-6224, um circuito de analógico de detecção de *quench* e um *multiplexer* de sinais de *quench*[18].

---

<sup>6</sup>sensores de fibra óptica de baixas perdas.

<sup>7</sup>Acrónimo de *Digital Quench Detection*, Detecção Digital de Quench na terminologia portuguesa

<sup>8</sup>Filtro analógico que precede o conversor ADC, com o intuito de reduzir a frequência de amostragem e consequentemente o consumo de potência à entrada deste.

<sup>9</sup>Acrónimo de *Analog-to-Digital converter*, Conversor Analógico-Digital na terminologia portuguesa.

<sup>10</sup>Acrónimo para *Superconducting Magnetic Energy Storage*, Armazenador de energia magnética supercondutor na terminologia portuguesa.



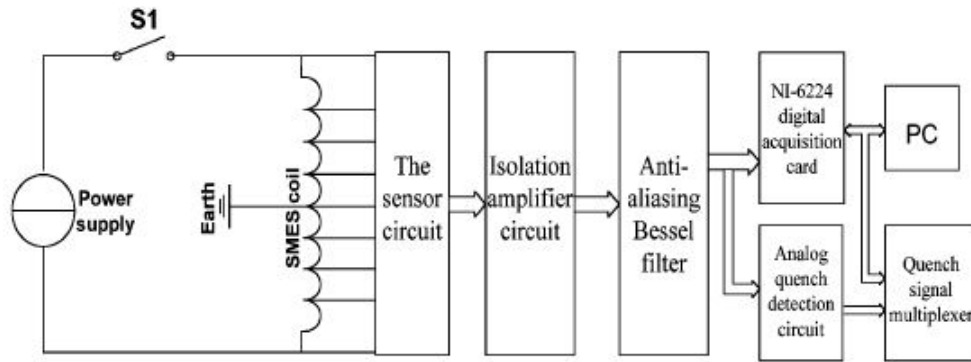


Figura 2.20: Diagrama de blocos do sistema de detecção de *quench*[18].

Para complementar o sistema de detecção de *quench*, é utilizado um *software* de controlo. Este é constituído pelos seguintes módulos[18]:

- a) Aquisição de dados;
- b) Armazenamento de dados;
- c) Processamento de dados;
- d) Ativação do sistema de proteção;

As tensões do magneto são amostradas pela placa de aquisição de dados e transferidos simultaneamente para o computador. O *software* armazena a aquisição de dados para serem estudados mais tarde. No entanto os sinais de tensão podem conter fortes ruídos causados pelas flutuações da fonte de alimentação ou pelo ambiente. O *software* também é responsável pela eliminação destes ruídos, tendo nele integrado vários métodos de filtragem, como filtros passa-baixo[18].

Os sinais de tensão depois de filtrados são analisados através de um método de comparação entre sinais de tensão. É utilizado um esquema equivalente a um par de enrolamentos do magneto como é mostrado na figura seguinte(figura 2.21).

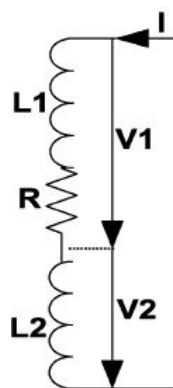


Figura 2.21: Esquema equivalente de um par de enrolamentos do magneto[18].

Onde  $V_1$  e  $V_2$  representam as tensões indutivas de duas secções do enrolamentos do magneto,  $L_1$  e  $L_2$  representam a indutância de duas secções dos enrolamentos do magneto e  $R$  representa uma resistência mínima que quando o seu valor é zero significa que não existe fenómeno de *quench*. O método pode ser descrito pelas seguintes equações[18]:

$$V_1 = L_1 \frac{di}{dt} + R * i \quad (2.8)$$

$$V_2 = L_2 \frac{di}{dt} \quad (2.9)$$

Como  $R = 0$  quando não existe *quench*, então:

$$V_1 = L_1 \frac{di}{dt} \quad (2.10)$$

$$V_2 = L_2 \frac{di}{dt} \quad (2.11)$$

Resolvendo as duas equações anteriores em ordem a  $i$ , tem-se:

$$\frac{di}{dt} = \frac{V_1}{L_1} \quad (2.12)$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{V_2}{L_2} \quad (2.13)$$

Logo:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{L_1}{L_2} = \alpha \quad (2.14)$$

Para duas secções dadas,  $\alpha$  é um coeficiente constante. Pode supor-se então, uma função de detecção de *quench*  $V_d = V_1 - \alpha V_2$ . O valor  $V_d$  torna-se numericamente bastante pequeno ajustando o coeficiente  $\alpha$  para um valor certo quando o magneto não entra em *quench*. Quando o valor de  $V_d$  ultrapassa um valor mínimo,  $V_{d0}$ , pode-se dizer que foi detetado um *quench* no magneto. Este sistema de detecção é bastante rápido e eficaz a identificar todos os fenómenos de *quench*, tendo também uma frequência bastante baixa de falso-positivos[18].

#### 2.4.2.5 Campo magnético

A detecção de *quench* baseada em campo magnético é o tema central desta dissertação. Esta técnica consiste na leitura de campos magnéticos utilizando sensores de Hall, detetando a degradação da corrente crítica na fita, mesmo antes do aparecimento de uma zona resistiva no interior do supercondutor[19], tirando partido da lenta propagação de *hotspots*, ou pontos quentes, tentando antecipar a proliferação. Este método de detecção envolve a divisão de uma fita 2G em duas partes de igual espessura ao longo do condutor, excepto nas áreas adjacentes aos seus terminais. Com ambas a fitas no estado supercondutor é introduzida uma dada corrente que vai ser dividida pelas duas partes da fita. Estando as correntes em equilíbrio (ausência de *quench*), o campo magnético lido entre

as duas fitas supercondutoras é praticamente nulo. Factores como fluxos de calor externos, imperfeições no material, entre outros, podem resultar na degradação da densidade de corrente crítica e consequentemente formação de pontos quentes. A diminuição de corrente da parte afetada, faz com que o excesso flua para a outra fita, resultando num desequilíbrio entre as correntes[19].

Consequentemente, este desequilíbrio de correntes, influencia o valor do campo magnético. Utilizando um sensor de campo magnético e dispondo-o estrategicamente entre as duas fitas, é de esperar que o valor lido assuma um valor diferente de nulo. São estas oscilações do valor do campo magnético que permitem detectar atempadamente o *quench*, dando tempo para prevenir este fenómeno[19].

Esta tese tem como objectivo utilizar alguns conceitos básicos do método anterior num limitador de corrente supercondutor do tipo indutivo, particularmente a utilização de sondas de Hall para detetar oscilações de campo magnético mas também a utilização de um sensor de hall por cada fita, permitindo assim para além de detetar o *quench*, determinar também em qual das fitas ocorreu. Com este alargamento do número de pontos de leitura é possível aprofundar o conhecimento do comportamento do campo magnético no sistema desenvolvido.

A abordagem seguida neste trabalho, bem como o sistema de deteção implementado serão apresentados, ao pormenor, nos capítulos seguintes.

## 2.5 Síntese e Conclusões

No capítulo presente foram abordados temas com a evolução histórica da supercondutividade, as diversas teorias existentes e algumas das contribuições mais importantes para o desenvolvimento desta área de estudo.

Foi feita uma descrição das propriedades mais relevantes dos materiais supercondutores, o seu comportamento e as classes existentes hoje em dia.

Por último, introduziu-se o tema principal desta dissertação, o fenómeno *quench*, nomeadamente, a sua deteção. Foi apresentado o que de positivo existe nesta área, explicando o que pode ser feito para colmatar algumas falhas ainda existentes. Para este efeito, foram estudados alguns exemplos concretos de técnicas de deteção de *quench* e os seus princípios de funcionamento.



## MODELO CONCEPTUAL E SIMULAÇÕES

Os LCS durante o seu funcionamento, estão sujeitos a diferente correntes e fluxos magnéticos. Apesar de cada um ter as suas características, intensidades e diferentes repercussões, todas elas afetam negativamente o seu desempenho, podendo mesmo no caso mais extremo, levar à destruição dos seus constituintes ou até à sua destruição total.

Uma das falhas que pode acontecer está relacionada com a degradação (*quench*) das fitas supercondutoras, que resulta quer do aumento abrupto do fluxo magnético, produzido, em grande parte pelas grandes correntes de curto-circuito quer pelo aumento da temperatura da fita, podendo assim perder a suas propriedades supercondutoras.

Este trabalho tem como principal objectivo poder estudar e analisar um novo método de deteção desta degradação nas fitas supercondutoras.

Nesta secção, apresenta-se e explica-se detalhadamente qual o método utilizado para conseguir os resultados pretendidos. Para que se consiga realizar as medições previstas, existe a necessidade de dimensionar dois tipos de circuitos, sendo que um deles é referente à montagem para o ensaio laboratorial do limitador e o segundo constituído pelo circuito elétrico responsável pelo processamento de sinal e aquisição de dados. Cada um destes circuitos tem funções bastante específicas e são constituídos por vários componentes, todos eles estudados e analisados nas secções seguintes.

### 3.1 Princípio de Funcionamento

O LCS, assemelha-se a um transformador com o secundário em curto-circuito, sendo o primário composto por uma bobina de cobre, enquanto o secundário composto por uma fita ou mais fitas supercondutoras.

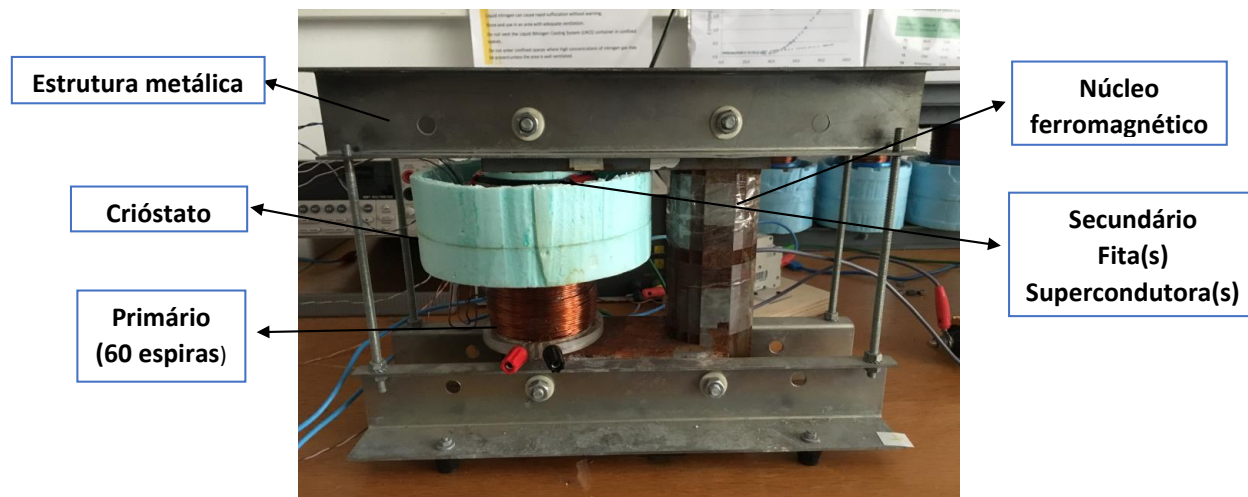


Figura 3.1: LCS indutivo do tipo transformador utilizado nos ensaios laboratoriais

Em regime de funcionamento normal, o secundário é responsável por blindar o fluxo simples no núcleo, ou seja, a força magnetomotriz do secundário faz com que se anule a FMM do primário, fazendo com que não exista tensão aos terminais do limitador, visto que não há variação de fluxo no núcleo.

No entanto, durante o curto-circuito, o facto de o secundário perder as características supercondutoras, devido ao aumento do fluxo magnético acima do valor crítico, faz com que exista uma queda de tensão aos terminais, impondo uma impedância na linha e permitindo a limitação de corrente por parte do limitador. O limitador de corrente utilizado, foi do tipo indutivo. Este por sua vez foi colocado numa rede e sujeito a correntes de curto-circuito, impostas propositadamente para o ensaio.

O protótipo do limitador de corrente supercondutor utilizado, é constituído por um núcleo ferromagnético formado por 106 chapas com 0,50mm de espessura de aço elétrico de grão não orientado, fixas e suportadas por uma estrutura metálica, onde também estão colocados o primário e o secundário.

O primário é constituído por enrolamentos de fio de cobre, com secção  $1,5\text{mm}^2$ . Foi utilizado um enrolamento com 60 espiras, assente num suporte de acrílico.

No secundário foram utilizadas até três fitas supercondutoras, curto-circuitadas, em forma de anel, suportadas por moldes, uns feitos em *Celeron* e outro feitos em plástico ABS, sendo que este último é frequentemente utilizado na impressão 3D. Ambos apresentam boas propriedades térmicas e mecânicas, tendo em conta as baixas temperaturas a que são submetidos.

### 3.1.1 Dimensionamento do circuito

Para que não haja qualquer tipo de danos, há que ter em conta as capacidades destes equipamentos, de modo a não por em risco os materiais em estudo, sendo que é preciso evitar ultrapassar os valores de corrente e tensão aconselhados. São estas duas grandezas que influenciam a corrente que irá ser imposta aos dispositivos. Para tal, antes de serem realizados quaisquer ensaios há a necessidade de se estipular algumas grandezas como a resistência de carga e a tensão aplicada. O dimensionamento foi feito utilizando o circuito equivalente à montagem utilizada, onde  $R_L$  representa a resistência de linha e  $R_C$  a resistência de carga.

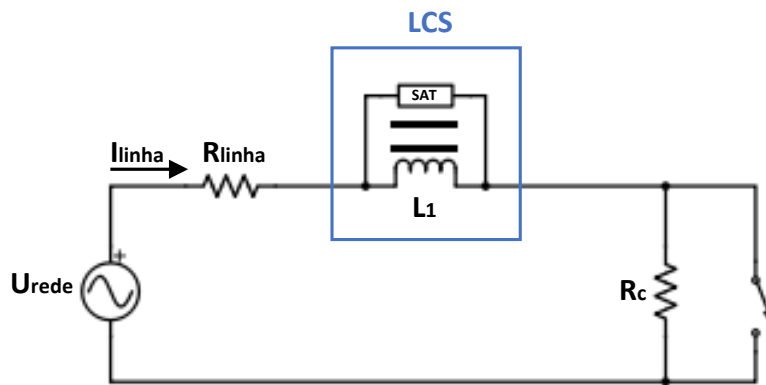


Figura 3.2: Esquema da montagem utilizada nos ensaios laboratoriais

Em primeiro lugar, calculou-se a corrente máxima admitida pelo primário do limitador, recorrendo à relação de transformação entre as correntes do primário  $I_P$  e do secundário  $I_S$ . No entanto tem de se ter em conta as características da fita supercondutora que constituem o secundário. A fita utilizada foi a fita SCS4050 de segunda geração.

Tabela 3.1: Características da fita supercondutor SCS4050

Largura (mm)	Espessura (mm)	Corrente Crítica (A)	Densidade de Corrente Crítica (A/mm <sup>2</sup> )
4	0.1	100	250

Como podemos observar pela tabela 3.1, a corrente crítica da fita supercondutora é de  $I_S = 100A$  e o primário possui 60 espiras ( $N_P = 60$ ), logo:

$$N_P * I_P = N_S * I_S \Leftrightarrow 60 * I_P = 1 * 100 \Leftrightarrow I_P = 1,66(6)A \quad (3.1)$$

Como não se vai utilizar apenas uma espira supercondutora  $N_S$  no secundário, tem-se de fazer também o cálculo anterior para várias espiras supercondutoras.

Tabela 3.2: Corrente máxima admitida pelo primário para diferentes números de espiras supercondutoras

Número de espiras supercondutoras ( $N_p$ )	Corrente máxima admitida pelo primário (A)
1	1,66(6)
2	3,33(3)
3	5

Sabendo agora a corrente máxima admitida pelo primário, o próximo passo é encontrar uma tensão a aplicar ao circuito, de modo a que estes limites sejam respeitados, não havendo o risco de causar qualquer dano ao equipamento. Decidiu-se então usar como referência 90% dos valores de corrente calculados anteriormente. Obtém-se assim como valores de corrente usadas as indicadas na tabela 3.3:

Tabela 3.3: Valores de corrente usados para diferentes números de espiras supercondutoras

Número de espiras supercondutoras ( $N_p$ )	Corrente máxima permitida pelo primário (A)	Valores de corrente usados (A)
1	1,66(6)	1,5
2	3,33(3)	3
3	5	4,5

Este limitador de corrente supercondutor, em funcionamento normal, não impõe qualquer tipo de impedância na rede, ou seja, é invisível a esta. Devido a este motivo, a corrente na linha  $I_L$  depende apenas da fonte de tensão e das resistências de linha e de carga. Logo, em regime normal, o circuito pode ser simplificado da seguinte maneira:

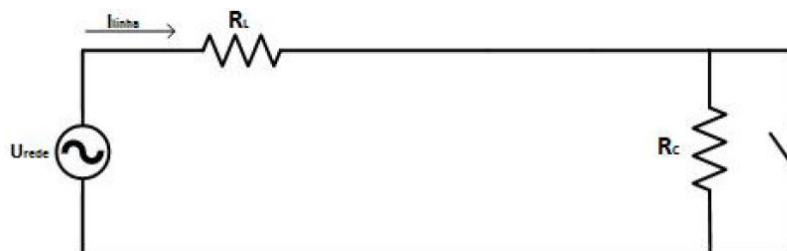


Figura 3.3: Esquema simplificado da montagem em funcionamento normal



Utilizando a Lei de Ohm e sabendo que  $R_L = 1\Omega$ , para que a corrente na linha não ultrapasse os valores pretendidos, e fixando o valor de  $R_C$ , calcula-se o valor de tensão de entrada máxima a ser aplicada pelo autotransformador  $U_{fonte}$ , para que estas condições sejam estabelecidas,

$$-U_{fonte} + I_L * R_L + I_L * R_C = 0 \Leftrightarrow U_{fonte} = I_L(R_L + R_C) \quad (3.2)$$

Como se tem diferentes valores de corrente, consoante o número de espiras no secundário, vai se ter também diferentes valores de tensão de entrada:

Tabela 3.4: Diferentes Valores de tensão de entrada para diferentes números de espiras supercondutoras

Numero de espiras supercondutoras ( $N_p$ )	Valores de corrente usados (A)	Resistência de linha $\Omega$	Resistência de carga $\Omega$	Tensão de entrada ( $U_{ef}$ ) (V)
1	1,5	1	80	86
2	3	1	30	66
3	4,5	1	30	99

Observando a tabela anterior, verifica-se que foram utilizados diferentes valores para a resistência de carga. O motivo destes diferentes valores é explicado pela corrente máxima admitida pela resistência de carga do laboratório. Para não se danificar o material teve de se utilizar diferentes resistências, uma para os ensaios com uma fita supercondutora, e outra resistência diferente para os ensaios com duas e três espiras supercondutoras.

## 3.2 Simulação do Sistema

Para a verificação da exequibilidade do sistema foi utilizado o *software* Flux2D que permite a simulação de fenómenos eletrodinâmicos, electrostáticos e magnéticos. Esta ferramenta oferece métodos de avaliação do comportamento na ocorrência de falha, daí ser interessante realizar este estudo com objetivo de compreender quais as variações que vamos observar aquando de um curto-circuito e até de um *quench* em uma das fitas.

Inicialmente é necessário definir a geometria de todas as regiões que completam o sistema (núcleo ferromagnético, primário e secundário). Com o intuito de avaliar a forma e natureza dos componentes presentes no modelo é gerada a rede de elementos finitos, vulgarmente designada por *mesh*. Outro passo importante na criação do sistema é a definição do tipo de material associado a cada uma das figuras geométricas projetadas.

Para que os resultados sejam o mais coerentes possível, as dimensões do modelo utilizado coincidem com as dimensões do protótipo de laboratório.

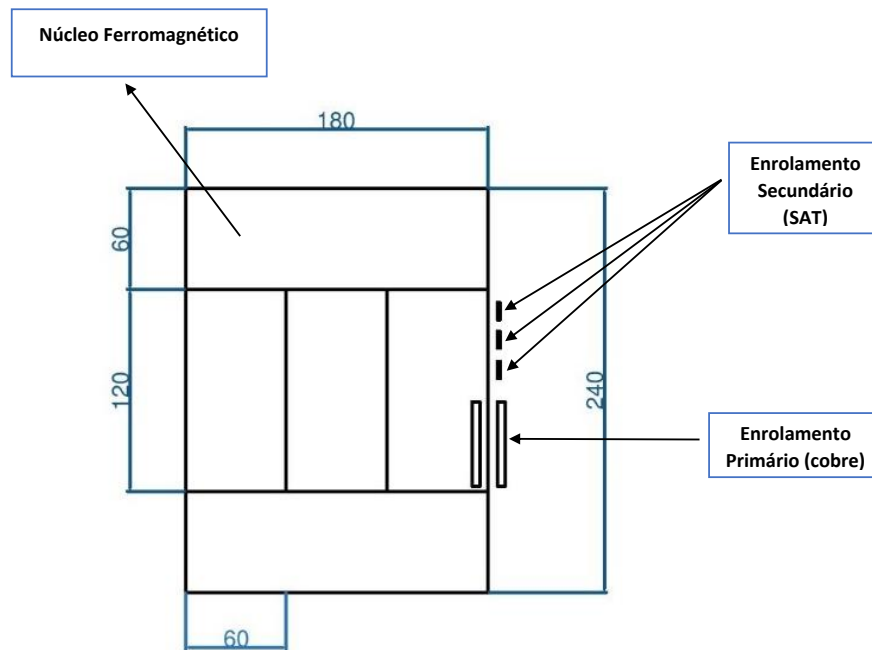


Figura 3.4: Modelo de simulação do Limitador de corrente supercondutor indutivo monofásico

### 3.3 Implementação Experimental

Nesta secção é explicado todo o processo de desenvolvimento de aquisição de dados, bem como todos os seus componentes essenciais.

#### 3.3.1 Aquisição de Dados

Para analisar corretamente todos os sinais necessários, é preciso recorrer à utilização de uma placa de aquisição de dados, neste caso, a placa da *National Instruments*, NI-6008. Esta possui 8 entradas analógicas *single-ended* com resolução de 12 bits e trabalha numa gama máxima de tensão de  $\pm 10V$ , tendo uma sensibilidade de  $\approx 7mV$ .

Este dispositivo é compatível com a ferramenta *Labview*, à qual se recorreu para o tratamento de dados. Em complementação, é necessário uma unidade central de processamento (PC) que processe a informação recolhida.



Figura 3.5: Placa de aquisição de dados NI-6008 da *National Instruments*

### 3.3.2 Sensores de Hall

A leitura do campo magnético é um dos aspetos mais relevantes deste trabalho. Para tal, é necessário assegurar o bom funcionamento dos sensores. Os sensores utilizados na montagem experimental ( modelo KSY14 da *Infineon Technologies*) são constituídos por quatro terminais, os terminais S1 e S2 através dos quais é fornecida a corrente necessária para alimentar as sondas, e os terminais S3 e S4 a partir dos quais se obtém a tensão de Hall que depois de amplificada permite efetuar a ligação à placa de aquisição de dados, transmitindo assim os sinais recolhidos a uma unidade central de processamento(PC).

Para adaptação da tensão de Hall à placa de aquisição de dados foi necessário implementar um circuito amplificador para cada sensor presente no sistema, para possibilitar uma leitura individualizada. O mesmo não se verifica para a fonte de corrente, que é suficiente para alimentar mais que um sensor em série com uma corrente de  $3mA$ .

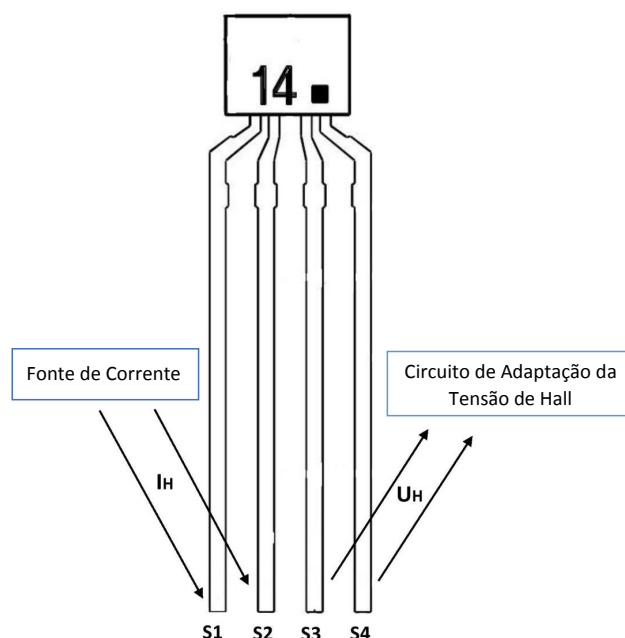


Figura 3.6: Diagrama relativo ao funcionamento do sensor de Hall KSY14.

Para além dos blocos mencionados em cima, também se usou uma fonte de alimentação para alimentar os circuitos da fonte de corrente e de adaptação da tensão de Hall  $U_H$  às características da entrada da placa de aquisição de dados.

#### 3.3.2.1 Fonte de Corrente

Tendo em conta as especificações dos sensores de Hall utilizados, existiu a necessidade de implementar uma fonte capaz de fornecer uma corrente constante de  $3mA$ . Esta corrente, foi garantida implementando o circuito exibido na figura 3.7

Para implementar o circuito exibido, foi necessário recorrer a uma tensão de referência

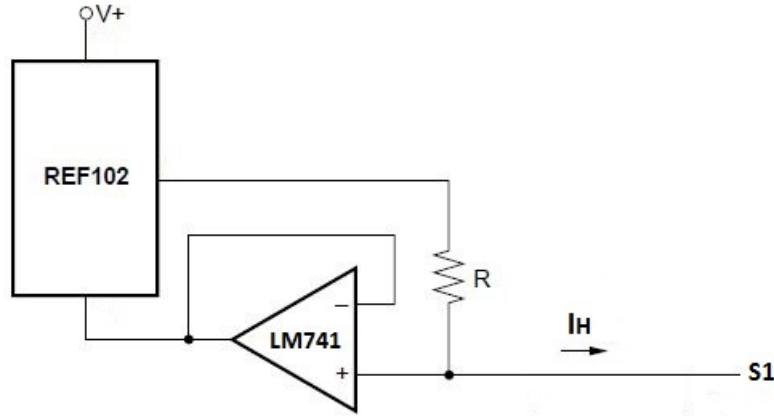


Figura 3.7: Diagrama esquemático da fonte de corrente para os sensores de Hall

de precisão de 10V (REF 102 da *Texas Instruments*). Como este tipo de sensor de Hall impõe algum *offset*, que aumenta e diminui consoante o valor de corrente que se utiliza para a sua alimentação, é de extrema importância que não haja variações de corrente. Graças a este componente consegue-se garantir que existe uma tensão precisa de 10V. Também foi necessário utilizar um amplificador operacional (LM 741 da *Texas Instruments*) com o sensor a ser ligado ao ramo positivo deste. De notar que o circuito implementado ainda é composto por uma resistência que possibilita o ajuste da corrente de saída do circuito para 3mA, valor necessário para alimentar os sensores de Hall presentes no sistema de detecção de *Quench*. A corrente de Hall  $I_H$  é nos dada então por:

$$I_H = \frac{10U}{R} \quad (3.3)$$

### 3.3.2.2 Circuito de Adaptação da Tensão de Hall

A informação proveniente dos sensores de Hall do sistema é enviada para um bloco de aquisição de dados, para permitir o seu processamento. Para tal, é necessário adaptar a tensão de Hall provenientes dos terminais S3 e S4 do sensor à entrada da placa de aquisição de dados. Com este objetivo foi então implementado um circuito que amplifique o sinal de saída aos terminais do sensor para o valor de tensão requerido pela entrada da placa de aquisição de dados.

O circuito de adaptação é composto unicamente por um amplificador de instrumentação INA-126. É importante mencionar que o ganho deste amplificador foi dimensionado para obter os melhores resultados possíveis, respeitando as limitações da placa de aquisição de dados. A amplificação desejada é então possível de ser calculada através da seguinte maneira:

$$G = 5 + \frac{80000}{R_G} \quad (3.4)$$

onde  $R_G$  representa resistência de Ganho. Alterando então o valor de  $R_G$  consegue-se obter diferentes valores para o ganho. Esta resistência foi dimensionada utilizando uma

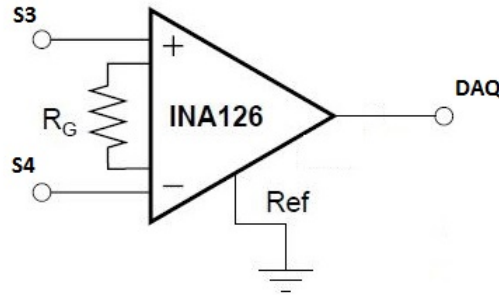


Figura 3.8: Circuito de adaptação da tensão de Hall às especificações da placa de aquisição de dados

resistência variável de  $5k\Omega$ , que foi fixada nos  $378\Omega$ , obtendo assim um ganho de 217.

### 3.3.3 Aquisição da Tensão aos terminais do Limitador de Corrente Supercondutor

Uma vez que a placa de aquisição de dados apenas admite tensões às suas entradas na gama  $\pm 10V$ , foi necessário proceder ao condicionamento de sinal, de modo a permitir a leitura de tensões elevadas durante os ensaios. O método utilizado para tal, baseia-se na montagem subtratora.

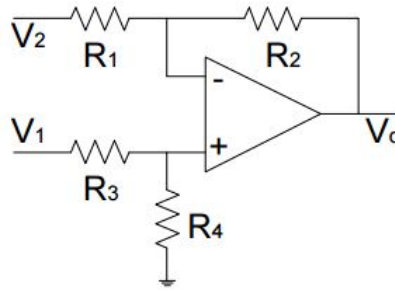


Figura 3.9: Montagem subtratora

Nesta montagem, a relação entre a diferença de potencial entre os terminais  $V_1$  e  $V_2$  e o potencial  $V_O$ , caso  $R_1 = R_3$  e  $R_2 = R_4$ , é expressa por:

$$V_O = \frac{R_2}{R_1} * (V_1 - V_2) \quad (3.5)$$

### 3.3.4 Aspectos Construtivos

De seguida serão apresentados os aspetos construtivos do sistema de deteção de *quench*.

Além do sistema de deteção também foi implementado um sistema que irá causar propositadamente um *quench* nas fitas supercondutoras.

### 3.3.4.1 Configuração da montagem de detecção

O protótipo do LCS como já foi dito anteriormente consiste num enrolamento primário ligado magneticamente com um circuito secundário, que é formado por material supercondutor. Cada fita é alimentada com uma dada corrente, correntes essas que geram um campo de indução magnética. O valor do campo referido é então determinado recorrendo a três sensores de Hall KSY14, estrategicamente posicionados em três pontos do sistema, cada um posicionado sobre cada uma das fitas.

O princípio de funcionamento deste sistema depende então da leitura e análise dos valores apresentados pelos três sensores de campo, para uma situação em que são criadas as condições existentes na ocorrência de um fenómeno de *quench* real. Quando este fenómeno ocorre o material nesse local degrada-se, resultando na formação de pontos quentes (desequilíbrio resistivo).

A variação da corrente na fita afetada obriga a uma redistribuição de correntes que consequentemente resulta em desequilíbrios no campo magnético. Esta leitura, levada a cabo pelos sensores de Hall, permite então detectar atempadamente a ocorrência ou não de um *quench* no sistema.

Para além disto, os sensores colocados nas fitas supercondutoras têm ainda a funcionalidade de determinar qual das fitas foi afetada, para uma proteção rápida e eficaz.

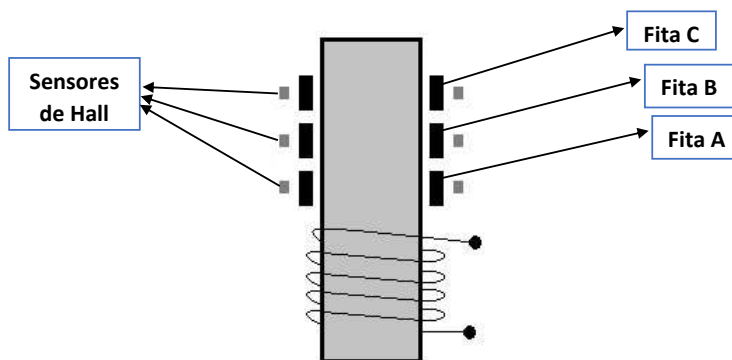


Figura 3.10: Representação de corte transversal do secundário do LCS

A configuração do sistema desenvolvido é exibido na figura 3.10, onde são apresentados os componentes do sistema. Na figura é visível a disposição das fitas no secundário bem como o posicionamento dos sensores de Hall.

É importante dizer que vão ser feitos diferentes ensaios, com diferentes números de espiras no secundário.

Os sensores tem de estar suficientemente perto da fita supercondutora para conseguirem detetar o campo magnético destas. Para isso, estes tem de ser fixados a cerca de  $1\text{ mm}$  das fitas. Os sensores de Hall foram, em primeiro lugar, presos numa base com quatro fios de cobre soldados a cada terminal dos sensores para garantir a sua estabilidade, como podemos ver na figura seguinte.

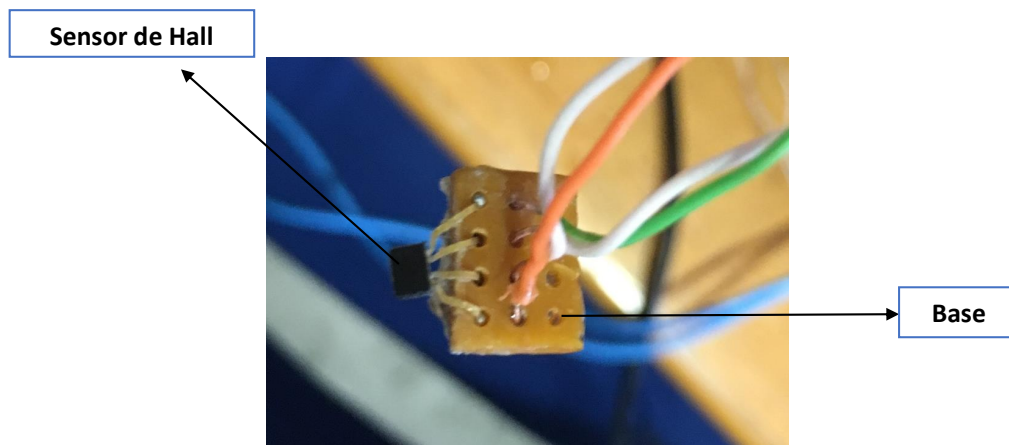


Figura 3.11: Base para o sistema de detecção

Para os sensores estarem à distancia desejada das fitas foram então fixos nos mesmos suportes onde irão ser colocadas as fitas.

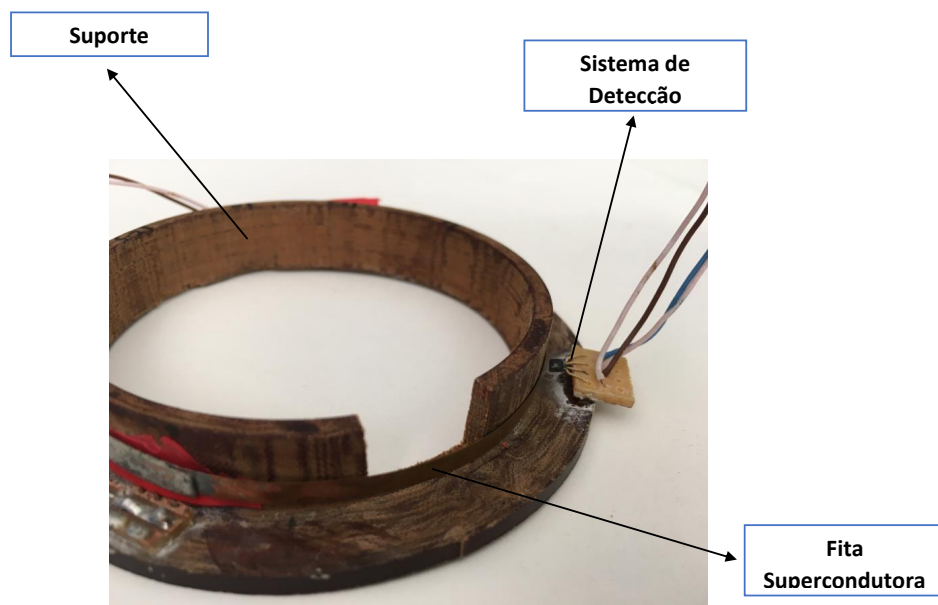


Figura 3.12: Suporte com o sistema de detecção

#### 3.3.4.2 Configuração do sistema de criação de *Quench*

Como já foi dito anteriormente, existem três maneiras de fazer com que um supercondutor perca as suas propriedades, ultrapassando o valor crítico de uma destas seguintes grandezas:

- Densidade de corrente  $J$ ;
- Campo magnético  $H$ ;
- Temperatura  $T$ ;

A criação de um *quench* foi conseguida ultrapassando o valor da temperatura crítica. Para tal recorreu-se a um *heater*. Este consiste numa resistência de alta potência que atravessada por uma determinada corrente provoca o aquecimento num ponto específico (*hotspot*) do supercondutor . Este ponto quente vai fazer com que apareça uma zona resistiva no seu interior, que se vai propagar ao longo de toda a fita supercondutora.

Foi utilizada uma resistência de  $15\Omega$ , com  $2W$  de potência. A esta foram soldados dois fios de cobre para permitir a passagem de corrente, que consequentemente vai criar um aumento de temperatura. A resistência por último vai ser fixa numa das fitas supercondutoras.



Figura 3.13: Resistência utilizada como *heater*

Como a resistência vai ser introduzida dentro de azoto líquido, esta tem de estar bastante bem isolada, para que o azoto não penetre entre a fita e a resistência, fazendo assim diminuir a transferência de calor.

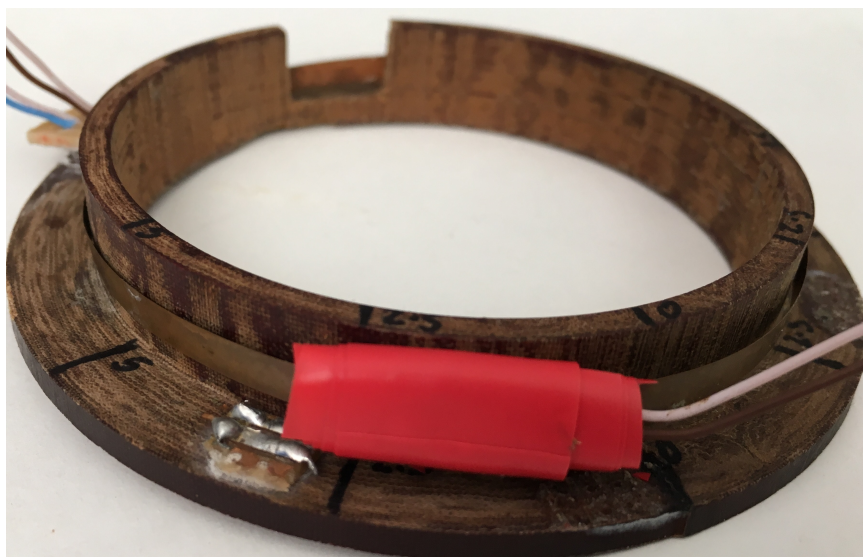


Figura 3.14: *Heater* isolado com fita isoladora



### 3.4 Síntese e Conclusões

Neste capítulo, foram descritos quais os elementos presentes na montagem laboratorial juntamente com as suas funções e objetivos.

Sabendo da grande importância que os campos magnéticos e a sua leitura têm para o desenvolvimento deste trabalho, é de referenciar o componente com maior influência, o sensor de Hall. Assim em torno da sua importância, foram ainda estudados os circuitos que possibilitam a sua utilização.

É importante de referir também, apesar de muito simples, o circuito de simulação de *quench*. Sem este também não era possível observar e analisar o comportamento das fitas face à presença deste fenómeno.

A aquisição de dados também é uma parte crucial do sistema, pois é graças a esta que é possível analisar os resultados com elevada precisão.



## ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

É necessário que haja um constante desenvolvimento de novas técnicas que ofereçam informação acerca do estado e das limitações dos diferentes dispositivos de potência.

Apesar da concordância verificada entre a metodologia proposta e os resultados provenientes das simulações realizadas, é necessário a validação do sistema desenvolvido num âmbito experimental. Assim foram realizados os ensaios necessários para comprovar se o comportamento do sistema em termos práticos é concordante com o exibido numa perspectiva virtual.

De seguida apresentam-se e discutem-se os resultados provenientes dos ensaios realizados. Todos os testes realizados são efetuados em regime alternado sinusoidal à frequência de 50Hz.

É importante dizer que as medidas elétricas podem ser afetadas por erros sistemáticos ambientais, como por exemplo, temperatura, humidade, pressão atmosférica e campos elétricos e/ou magnéticos. A par dos erros sistemáticos ambientais, também temos de considerar os erros aleatórios que poderão ter influência nos resultados, nomeadamente o ruído, que pode ter diversas origens.

### 4.1 Ensaio 1 : Uma espira supercondutora, funcionamento normal

Relativamente ao primeiro ensaio realizado, este tem como objetivo a observação do comportamento do sistema num primeiro caso em funcionamento normal com apenas uma fita. A figura 4.1 mostra a configuração utilizada para o conjunto de testes com uma fita supercondutora no secundário.

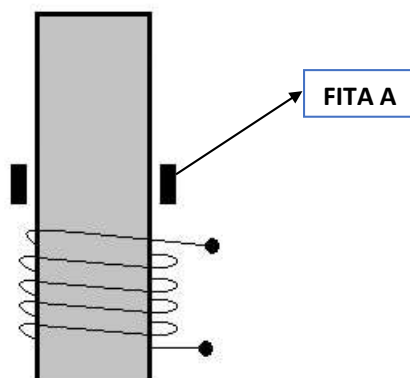


Figura 4.1: Configuração com 1 espira supercondutora no secundário

Com este processo é possível analisar os valores de campo magnético lido pelo sensor presente no sistema.

A montagem realizada para o ensaio em estudo é apresentada na figura seguinte.

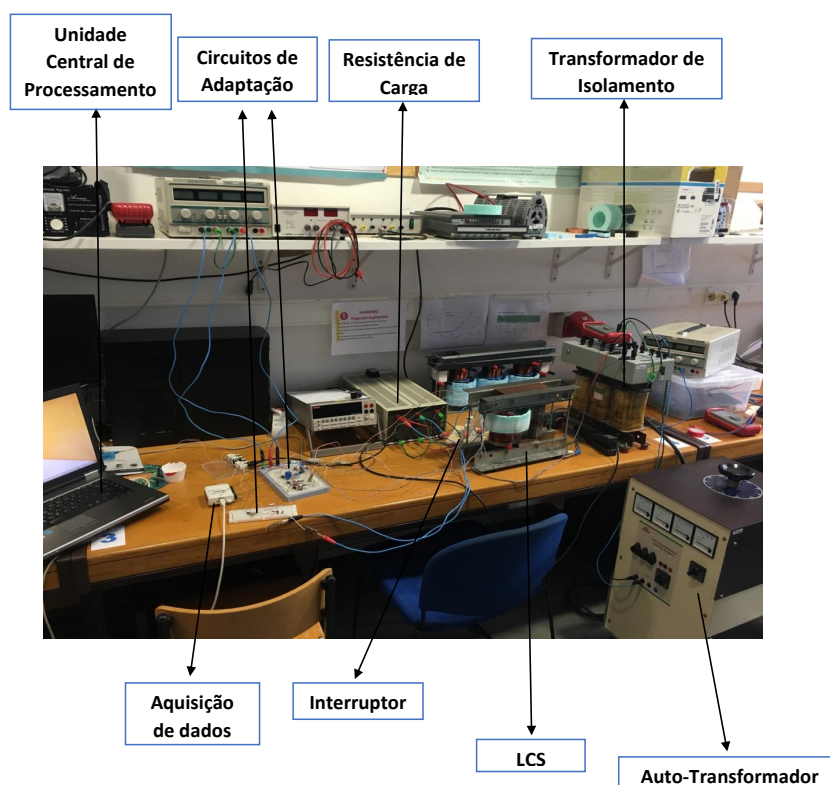


Figura 4.2: Montagem experimental utilizada para a realização dos ensaios.

A função dos vários equipamentos usados encontram-se a seguir descritas:

- **Auto-Transformador 0V – 400V:** Utilizado para produzir uma tensão variável aos terminais do transformador de isolamento.

- **Transformador de Isolamento:** Garante isolamento galvânico de modo a evitar correntes de fuga na montagem experimental.
- **LCS indutivo do tipo transformador:** Dispositivo de potência a ensaiar. Este é constituído por um primário com 60 espiras de cobre e por uma ou mais espiras supercondutoras.
- **Circuitos de Adaptação:** Essencial no processo. Constituído pelo circuito de aquisição de tensão aos terminais do limitador e o circuito de aquisição das tensões de Hall.
- **Interruptor:** permite transitar o sistema para o funcionamento em caso de falha, ou seja, estabelece curtos-circuitos na rede curto-circuitando a carga.
- **Placa NI-6008 (Aquisição de Dados):** Necessária para adquirir diferentes grandezas recorrendo aos seus canais.
- **Unidade Central de Processamento:** Permite a receção e o tratamento de dados provenientes da placa de aquisição de dados, utilizando o *software* adequado.

Em funcionamento normal, o LCS blinda magneticamente o seu núcleo, pois como o secundário encontra-se curto-circuitado, faz com que as FMM se anulem, fazendo com que não haja penetração de fluxo no núcleo. Pode-se dizer então que caso não haja um curto-circuito na linha, que consequentemente aumenta a corrente na linha, o supercondutor continua no estado supercondutor não havendo variação na densidade de fluxo magnético do mesmo, como se pode observar pela figura 4.3.

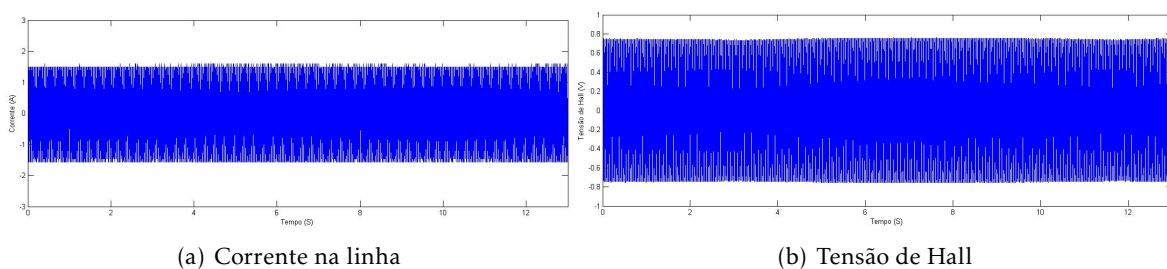


Figura 4.3: Corrente de Linha e Tensão de Hall com uma espira no secundário.

Tal como foi referido anteriormente, estabelece-se então uma corrente na linha de 1,5A.

No decorrer deste processo os valores da tensão de Hall lido no sensor presente no sistema, são enviados para a unidade central de processamento recorrendo à placa de aquisição de dados NI-6008. Infelizmente não houve a possibilidade de calibrar os sensores por defeito do gaussímetro disponível para esse efeito. No entanto, o mais importante nestes ensaios são os aspetos qualitativos. Através destes podemos verificar se houve alguma

falha, quer um curto-circuito, quer uma falha interna do limitador, mais precisamente na espira supercondutora.

É importante de mencionar que quer a corrente, quer a tensão de Hall são caracterizadas por serem ondas sinusoidais com frequência idêntica à da rede,  $50\text{Hz}$ . Estas propriedades são intrínsecas a todos os ensaios feitos.

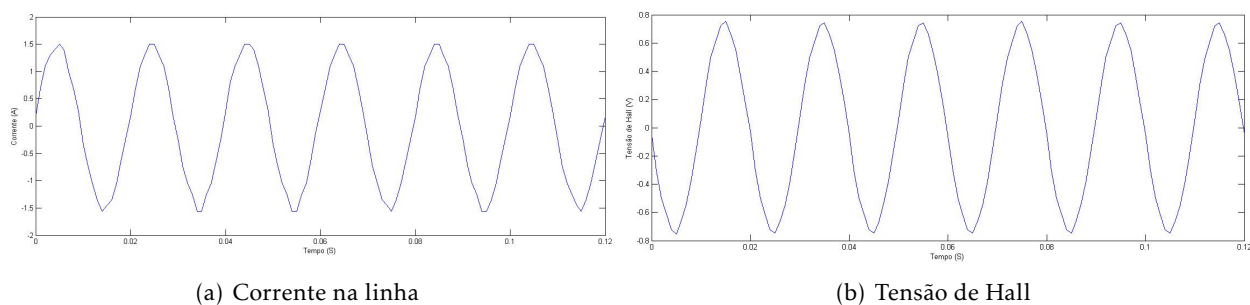


Figura 4.4: Gráficos em detalhe da Corrente de Linha e Tensão de Hall com uma espira no secundário .

Observando os valores da tensão aos terminais do limitador também se pode concluir que não ouve nenhum curto-circuito, ou seja, não existe um aumento de tensão ao longo do ensaio, sendo que apenas detetamos a sensibilidade da placa de aquisição de dados.

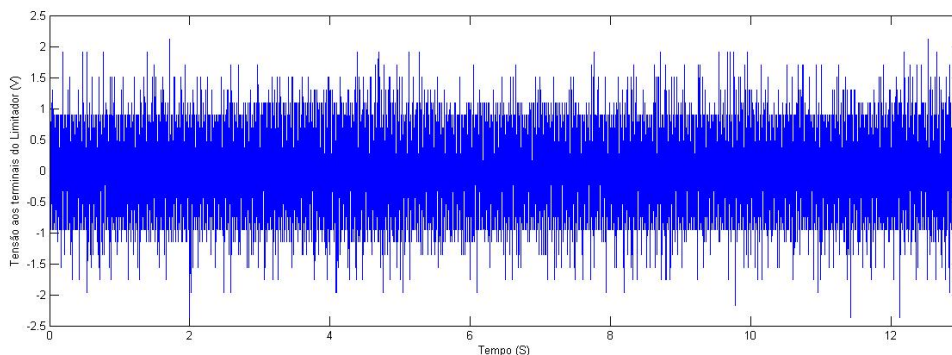


Figura 4.5: Tensão aos terminais do limitador

## 4.2 Ensaio 2: Uma espira supercondutora, funcionamento em caso de falha

Em situações de falha, o limitador necessita de assegurar a elevada limitação de corrente, no menor intervalo de tempo de resposta possível. Então, na ocorrência de um curto-circuito, o LCS deve apresentar uma elevada impedância de modo a que a corrente de curto-circuito seja limitada para que não esta não coloque em perigo os elementos presentes no circuito.

Na figura 4.6 observam-se os resultados no momento de transição entre o regime normal e o regime de falha. Inicialmente é feita a ligação do auto-transformador, fazendo

#### 4.2. ENSAIO 2: UMA ESPIRA SUPERCONDUTORA, FUNCIONAMENTO EM CASO DE FALHA

com que o limitador se encontre em regime normal. Por volta dos 5 segundos, recorrendo ao interruptor, é imposto um curto-circuito à rede. Esta ação faz com que a corrente de linha atinja instantaneamente valores perto dos 30A, mantendo-se durante todo o curto-circuito ao longo de 1 segundo. Nos momentos antecedentes à falha, a densidade de fluxo magnético na fita supercondutora não apresenta qualquer tipo de variação.

No momento em que é imposto o curto-circuito, existe uma variação dos valores da tensão de Hall, chegando quase aos 3V de amplitude máxima. Nos instantes a seguir, este valor tende para estabilizar em valores mais pequenos até ao final do curto-circuito, aproximadamente até aos 6 segundos. A partir dos 6 segundos, observamos que estes valores reduzem drasticamente (cerca de 80% do valor atingido no final do curto-circuito). Por volta dos 7 segundos, a espira supercondutora volta ao seu estado supercondutor. No entanto não consegue voltar aos mesmos valores de amplitude que atingiu antes do curto-circuito.

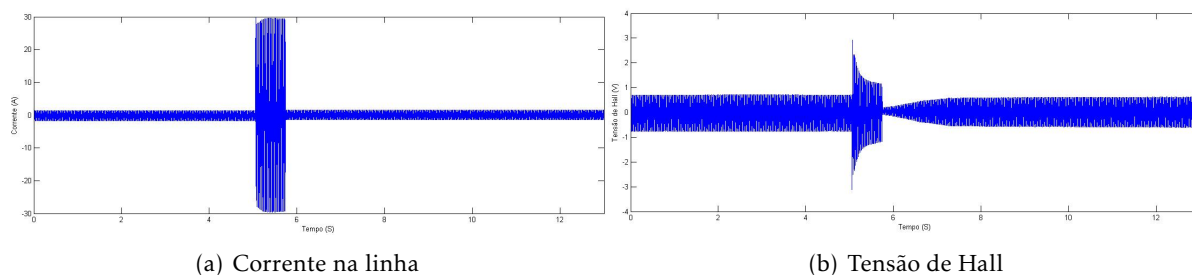


Figura 4.6: Corrente na Linha e Tensão de Hall com uma espira no secundário em caso de falha.

Como era de esperar, no caso de operação em falha, o limitador de corrente vai apresentar uma variação de tensão aos seus terminais. Porém, após o curto-circuito, os valores não estabilizam próximo do 0V mas sim próximo dos 3V, como podemos ver na figura 4.7. Isto é facilmente explicado devido à perda de capacidade do supercondutor de voltar aos seus valores de amplitude que tinha antes de acontecer o curto-circuito como vimos na figura anterior.

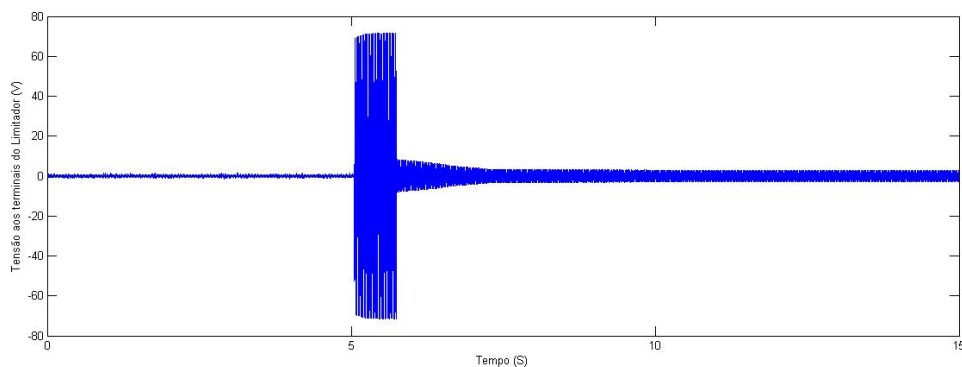


Figura 4.7: Tensão aos terminais do limitador

### 4.3 Ensaio 3: Uma espira supercondutora, simulação de *Quench*

Este ensaio tem como objetivo a observação do comportamento do sistema face a um fenómeno real de *quench*. É simulado então um aparecimento de um ponto quente na espira supercondutora. Tal como nos ensaios anteriores, esta análise é feita com base na leitura da tensão de Hall proveniente do sensor de Hall implementado no sistema.

Um dos aspetos mais importantes deste ensaio é verificar a possibilidade de existência de um falso curto-circuito, ou seja, uma variação de tensão aos terminais do limitador sem aparecer uma variação na corrente de linha, isto devido ao aparecimento de um *quench* na espira supercondutora.

Observando a figura 4.8, por volta dos 27 segundos, existe uma variação da tensão de Hall. Esta variação é criada, como já foi dito anteriormente, através da introdução de um *heater* sobre a fita supercondutora. Este ao aquecer vai criar um ponto quente que faz com que existam variações no campo de indução magnética, que por sua vez, origina variações na tensão de Hall.

Esta alteração na densidade de fluxo magnético faz com que o limitador deixe de estar invisível à rede, aparecendo uma tensão aos terminais deste. Quanto maior for a variação da densidade de fluxo magnético, ou seja, quanto maior for o *quench*, maior será a variação do valor da tensão aos terminais do limitador.

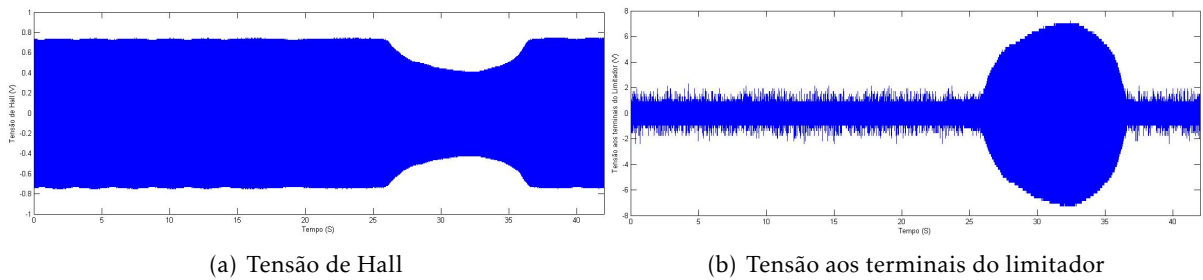


Figura 4.8: Tensão de Hall e tensão aos terminais do limitador com uma espira no secundário em caso de *quench*.

No entanto, apesar desta variação de tensão no limitador, pelo gráfico da corrente na linha, conclui-se que não houve nenhum curto-circuito.

Pode-se afirmar, pela observação da tensão aos terminais do limitador e da corrente na linha que se está perante o caso de um falso curto-circuito. Apesar disso, como também se monitoriza o campo de indução magnética, pode-se concluir que este falso curto-circuito é causado pelo mau funcionamento da espira supercondutora, comprovando assim a validade do método de detecção proposto.



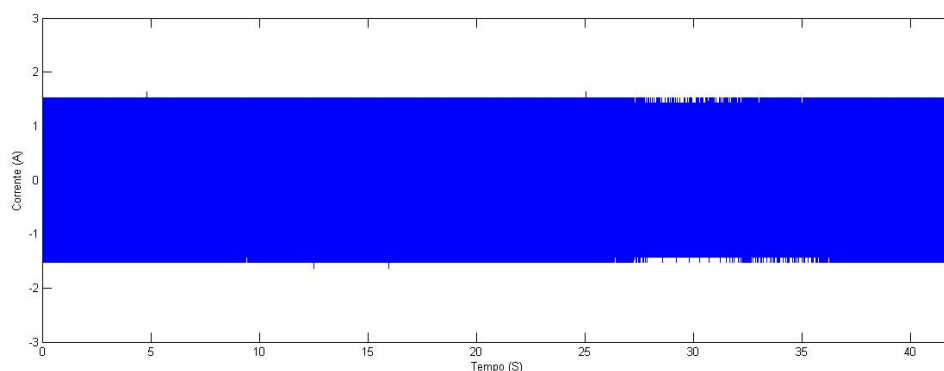


Figura 4.9: Corrente na linha com a simulação de *quench*

#### 4.4 Ensaio 4: Duas espiras supercondutoras, funcionamento normal

Este ensaio tem o propósito de analisar o comportamento do sistema quando adicionada mais uma espira supercondutora ao secundário, passando assim a duas espiras SAT.

Com este teste é possível compreender as diferenças entre os campos de indução magnética das duas espiras do secundário. A configuração utilizada está representada na figura seguinte.

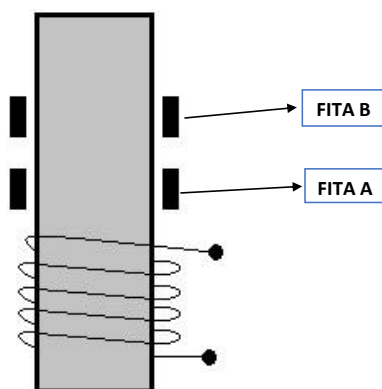


Figura 4.10: Configuração com 2 espiras supercondutoras no secundário

Para este ensaio, como já foi mostrado anteriormente, a corrente na linha tem o valor máximo de 3A como se pode ver pela figura 4.11.

Comparativamente ao ensaio com uma espira SAT no secundário, pode-se afirmar que ao adicionar mais um anel supercondutor, isto permite aumentar a corrente de linha para praticamente o dobro.

Relativamente à tensão aos terminais do limitador, como se está a trabalhar em funcionamento normal, é natural que este não apresente praticamente tensão nenhuma aos seus terminais.

Analisando agora a densidade de fluxo magnético nas fitas, através da tensão de Hall, observa-se que apesar de serem ambas ondas alternadas sinusoidais e com a frequência

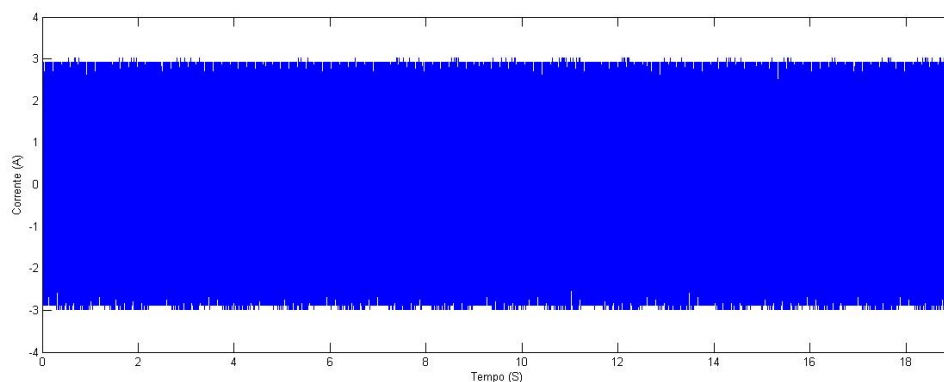


Figura 4.11: Corrente na linha para duas espiras no secundário em regime normal

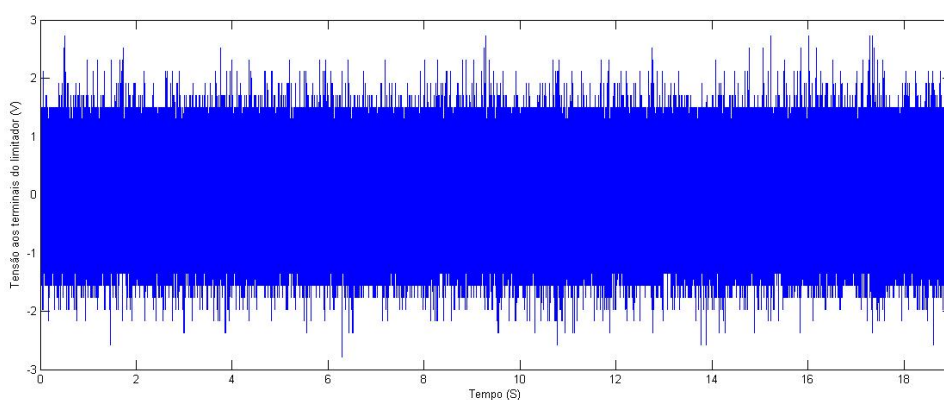


Figura 4.12: Tensão aos terminais do limitador com duas espiras supercondutoras em regime normal

igual à da rede ,50Hz, na fita A, os valores máximos atingidos por esta são maiores em comparação com a tensão de Hall proveniente do sensor da fita B, como podemos ver pela figura 4.13.

Isto pode acontecer por dois motivos. Como a fita A se encontra bastante mais próxima do primário, esta é influenciada pelas linhas de fluxo magnético provenientes deste, aumentando as correntes induzidas na fita que por sua vez vão aumentar o campo de indução magnético desta. Ou então o contrário, o sensor colocado na fita B deteta menos linhas de campo porque esta fita encontra-se mais afastada do primário.

#### 4.5 Ensaio 5: Duas espiras supercondutoras, funcionamento em caso de falha

Através do recurso a um secundário composto por duas espiras SAT, verificam-se algumas melhorias relativamente ao caso onde o secundário era composto unicamente por uma espira. O processo do ensaio é idêntico ao teste feito para uma fita SAT no primário, ou seja, inicia-se o ensaio em funcionamento normal, fixando o valor máximo da corrente

#### 4.5. ENSAIO 5: DUAS ESPIRAS SUPERCONDUTORAS, FUNCIONAMENTO EM CASO DE FALHA

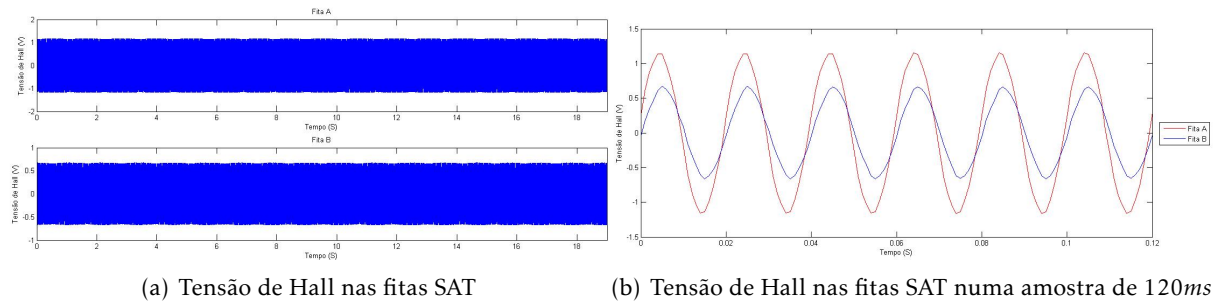


Figura 4.13: Tensão de Hall com duas espiras no secundário em regime normal

de linha nos 3A neste caso. De seguida aciona-se o interruptor, durante cerca de um segundo, fazendo o sistema transitar do regime normal para o regime de falha, como se pode observar pela figura 4.14.

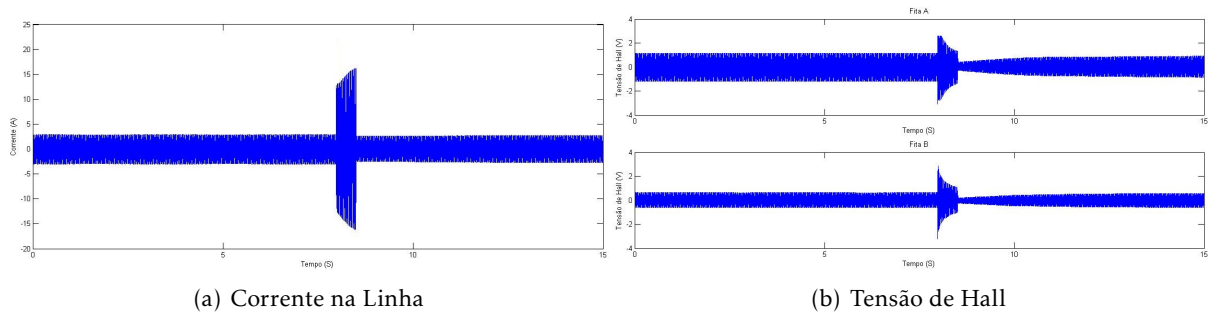


Figura 4.14: Corrente na linha e Tensão de Hall com duas espiras no secundário em regime de falha

Comparativamente aos resultados obtidos com uma espira SAT, o comportamento das fitas é praticamente o mesmo a nível qualitativo. Em regime normal, a fita A apresenta uma tensão de Hall maior do que a fita B. No entanto quando o interruptor é acionado e se dá início ao curto-circuito, as fitas apresentam valores bastante idênticos de tensão de Hall, cada uma apresentando um valor máximo de quase 3V. Após o curto-circuito, ambas as fitas SAT passam para um estado resistivo, voltando para o estado supercondutor passado algum tempo. No entanto, nenhuma delas consegue atingir os valores máximos que atingiram antes do curto-circuito ocorrer, como foi observado no caso de quando apenas existia uma espira no secundário.

Analisando a figura 4.15, reparamos que o comportamento do limitador foi praticamente igual quando apenas existia uma fita SAT, ou seja, como nenhuma das fitas supercondutoras consegue recuperar o seu estado supercondutor na totalidade, mesmo após o curto-circuito, o limitador apresenta valores de tensão aos seus terminais.

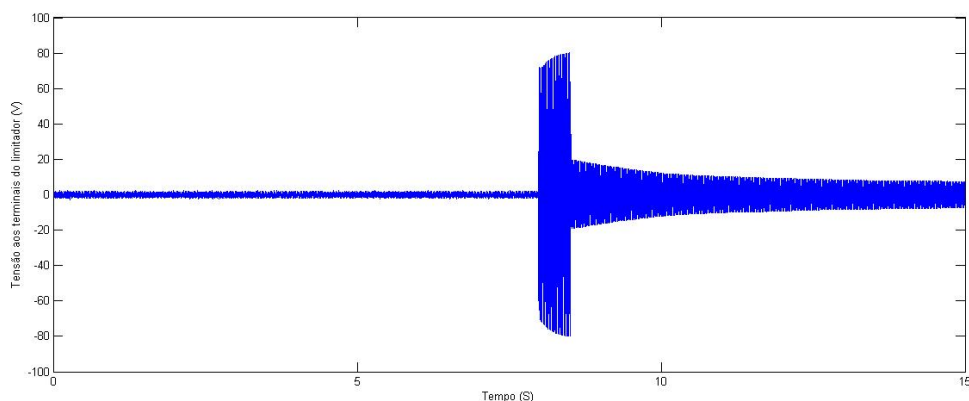


Figura 4.15: Tensão aos terminais do limitador em regime de falha com duas espiras no secundário

## 4.6 Ensaio 6: Duas espiras supercondutoras, simulação de *quench*

Nesta secção irá ser analisado o comportamento do sistema face a uma simulação de *quench*. O método utilizado é idêntico quando existia apenas uma espira. Porém serão feitos dois testes onde se vai observar o comportamento das fitas em separado. Em primeiro lugar vamos realizar um *quench* na fita A e em segundo lugar na fita B.

### 4.6.1 Simulação de *quench* na fita A

O objetivo deste ensaio, além de detetar um falso curto-circuito no sistema, também é observar e analisar o comportamento da fita B quando ocorre um *quench* na fita A.

Como se pode ver na figura 4.16, como era de esperar ao ligarmos o *heater* sensivelmente aos 20 segundos, a densidade de fluxo magnético na fita A diminui consoante maior a temperatura deste *hotspot*. No entanto identicamente ao ensaio feito com uma espira no secundário, nunca se permite que a fita perca as suas propriedades supercondutoras na totalidade ou seja, não se deixa que esta *quench* totalmente mas sim parcialmente, permitindo o retorno ao seu estado supercondutor.

Relativamente à fita B, acontece um fenómeno interessante. No mesmo instante em que começa o *quench* na fita A, a tensão de Hall começa a variar, aumentando na mesma proporção com que a fita A diminui. A fita B consegue compensar a perda das propriedades condutoras da outra fita. Apesar

Analisando os resultados obtidos da tensão aos terminais do limitador, figura 4.17, observa-se que não houve qualquer variação significativa nestes valores, ou seja, não houve um falso curto-circuito. Esta diferença, comparando com os resultados do ensaio com apenas um anel supercondutor no secundário, é facilmente explicada pelo facto da fita B conseguir compensar a perda das propriedades supercondutoras da Fita A. No entanto o caso poderia ser completamente diferente se houvesse um *quench* total na fita. Caso isto acontecesse, a fita A não iria retornar ao estado supercondutor, ficando

#### 4.6. ENSAIO 6: DUAS ESPIRAS SUPERCONDUTORAS, SIMULAÇÃO DE *QUENCH*

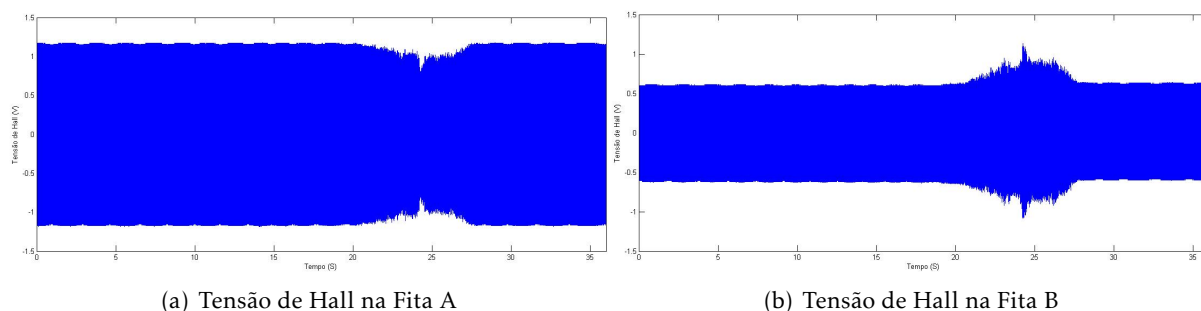


Figura 4.16: Tensões de Hall nas fitas SAT com *quench* na fita A

no estado resistivo. Este comportamento pode causar efeitos nocivos para a outra fita, pois o limitador está a funcionar apenas com uma fita. A corrente induzida na fita B iria ultrapassar o seu valor crítico podendo esta também estragar-se, comprometendo assim a integridade do limitador de corrente.

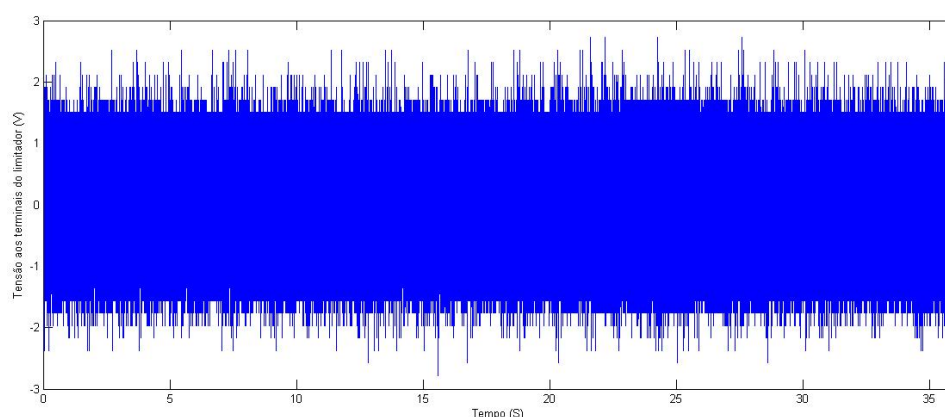


Figura 4.17: Tensão aos terminais do limitador com *quench* na fita A

##### 4.6.2 Simulação de *quench* na fita B

O propósito deste ensaio é o mesmo que o anterior, diferindo apenas em qual fita se vai aplicar a simulação do *quench*. Ao contrário do teste anterior, agora vai se analisar o comportamento da fita A quando ocorre um *quench* na fita B.

Analisando a figura 4.18, observa-se que o comportamento das fitas é completamente igual ao do teste anterior. Semelhantemente, quando se cria o ponto quente na fita B, há uma diminuição da tensão de Hall da fita B, o que vai provocar então um aumento, de proporções iguais, da tensão de hall na fita A, de modo a compensar a perda de supercondutividade da fita onde foi criado o ponto quente.

Em relação à tensão aos terminais do limitador, o comportamento também é bastante semelhante, no entanto consegue-se observar uma ligeira variação de tensão quando o *quench* é imposto na fita B. Porém, neste caso, esta variação não é suficiente para que seja considerada um falso curto-circuito.

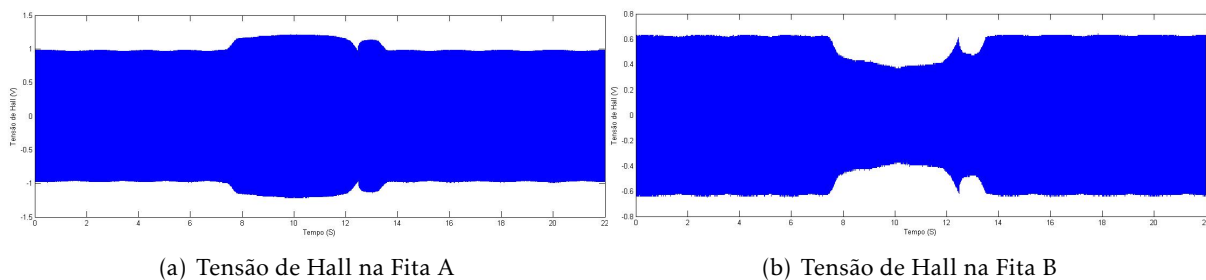


Figura 4.18: Tensões de Hall nas fitas SAT com *quench* na fita B

Uma perda total das propriedades supercondutoras na fita B, apresenta os mesmos riscos para o limitador como no caso anterior, pelas razões que foram descritas.

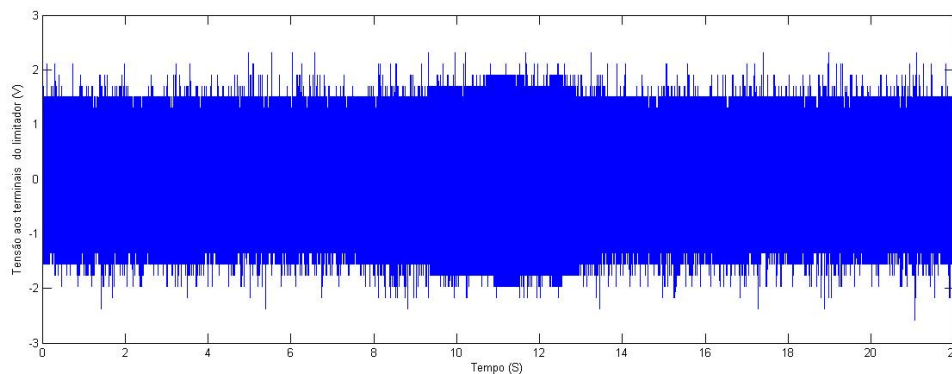


Figura 4.19: Tensão aos terminais do limitador com *quench* na fita B

## 4.7 Ensaio 7: Três espiras supercondutoras, funcionamento normal

Este ensaio, agora com três espiras supercondutoras no secundário, tem como fim o mesmo que os outros ensaios anteriores em funcionamento normal, ou seja avaliar o comportamento do sistema em caso de regime normal e compreender as diferenças entre os campos de indução magnética das três espiras.

A montagem realizada para os ensaios com três espiras é apresentada na figura 4.20.

Para a realização deste ensaio, com ja foi dito anteriormente, a corrente na linha vai ter um valor máximo de 4,5A como podemos observar pela figura 4.21.

Em comparação com o ensaio com uma espira supercondutora, agora ao adicionar mais duas espiras, isto possibilita o aumento da corrente de linha para o triplo.

Como se está a trabalhar em regime normal, a tensão aos terminais do limitador apresenta valores bastante reduzidos, atingindo o seu máximo quase nos 2,5V, cerca de 2,5% da tensão de entrada.

O campo magnético induzido nas fitas, tem um comportamento relativamente idêntico ao ensaio com duas espiras supercondutoras. A fita mais próxima do primário, a fita

#### 4.7. ENSAIO 7: TRÊS ESPIRAS SUPERCONDUTORAS, FUNCIONAMENTO NORMAL

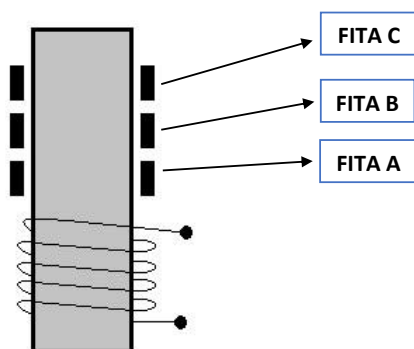


Figura 4.20: configuração com 3 espiras supercondutoras no secundário

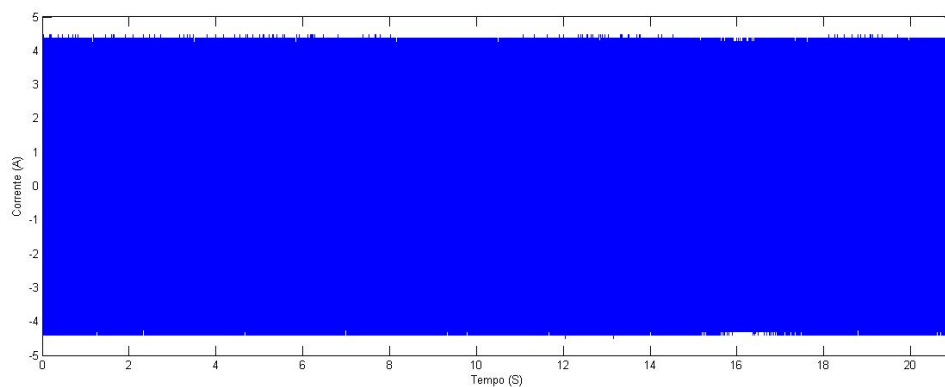


Figura 4.21: Corrente na linha para três espiras no secundário em regime normal

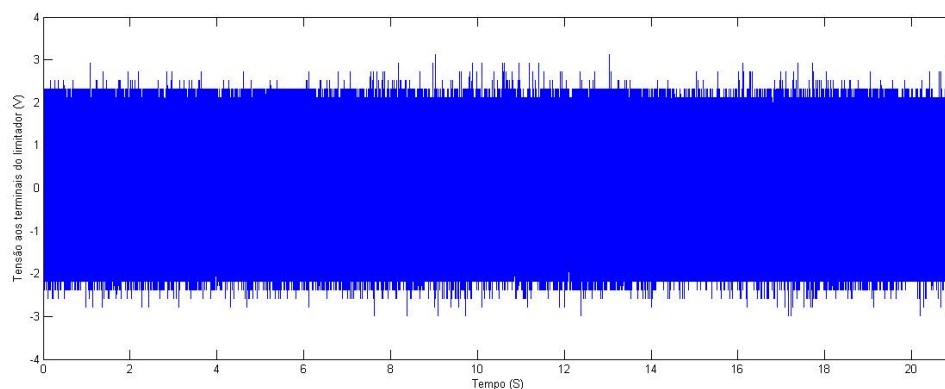


Figura 4.22: Tensão aos terminais do limitador com três espiras supercondutoras em regime normal

A, apresenta máximos maiores comparativamente às outras duas fitas. No entanto, a fita B apesar de estar mais perto do primário do que a fita C, esta ultima apresenta maiores máximos do que a fita que se encontra no meio, apesar desta diferença ser bastante ligeira. Isto acontece pois as linhas de fluxo magnético tendem em fechar-se pelas fitas A e C.

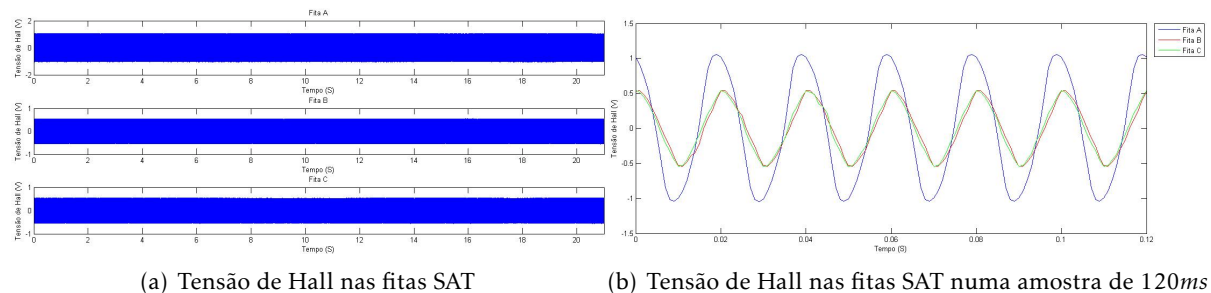


Figura 4.23: Tensões de Hall com três espiras no secundário em regime normal

#### 4.8 Ensaio 8: Três espiras supercondutoras, funcionamento em caso de falha

O processo do ensaio é semelhante aos ensaios anteriores em caso de falha, quer com apenas uma espira SAT, quer com duas espiras no secundário. A corrente de linha é fixada num valor máximo de 4,5A, idêntico ao caso do funcionamento normal. Obriga-se o sistema transitar para o modo de falha quando o interruptor é ligado por volta dos 6 segundos, durante aproximadamente 1 segundo, como se pode observar pela figura 4.24.

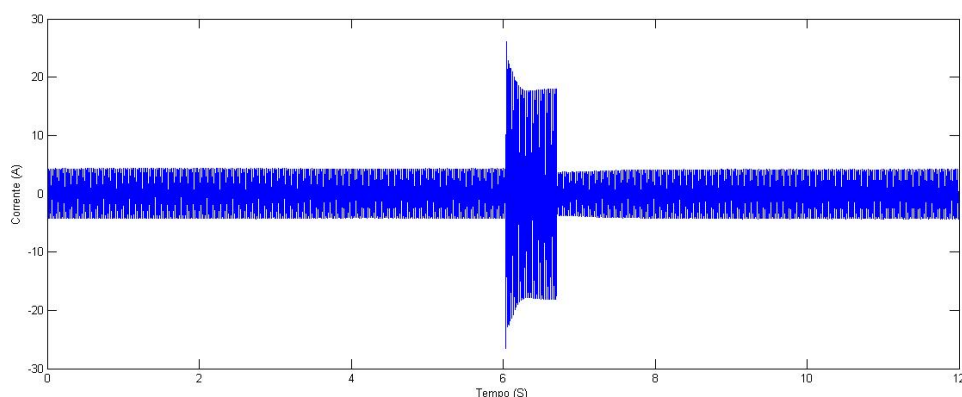


Figura 4.24: Corrente na linha

No entanto, relativamente à tensão de Hall nas fitas, o comportamento vai ter algumas diferenças relativamente aos ensaios anteriores. Por este motivo irão ser analisadas separadamente.

Analisando a tensão de Hall da fita A (figura 4.25), após o curto-circuito, esta transita para o estado resistivo. No entanto, ao contrário dos ensaios com uma ou duas espiras supercondutoras, que voltavam aos seus estados supercondutor gradualmente ao longo do tempo, neste caso a fita A permanece no estado resistivo durante cerca de 2 segundos. Em semelhança aos casos de falha anteriores, esta também não consegue recuperar o seu estado supercondutor na totalidade mesmo que agora esta diferença seja bastante menos notória.

O mesmo acontece com a fita B, como podemos ver com a figura 4.26. Esta fita, após o



#### 4.8. ENSAIO 8: TRÊS ESPIRAS SUPERCONDUTORAS, FUNCIONAMENTO EM CASO DE FALHA

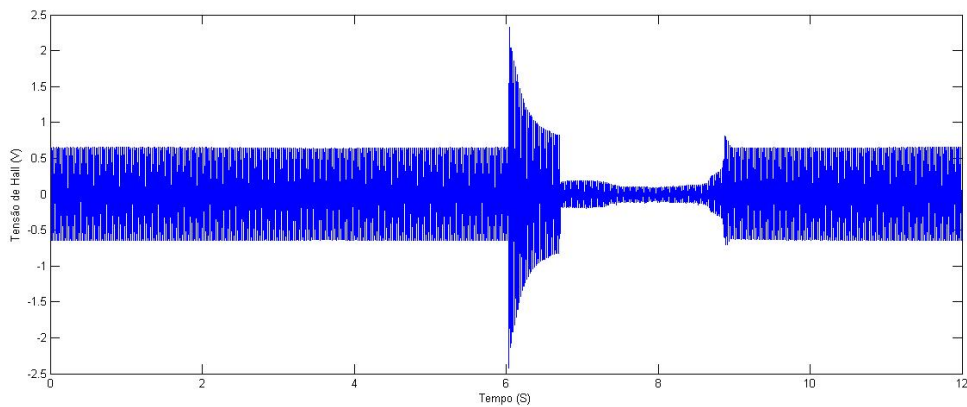


Figura 4.25: Tensão de Hall na fita A

curto-circuito, também não retorna gradualmente ao seu estado supercondutor, ficando durante algum tempo no estado resistivo. No entanto, como a tensão de Hall desta é menor do que comparada com os valores da fita A, a transição entre estados, que acontece aos 9 segundos, não é tão abrupta como verificada na fita que se encontra mais perto do primário.

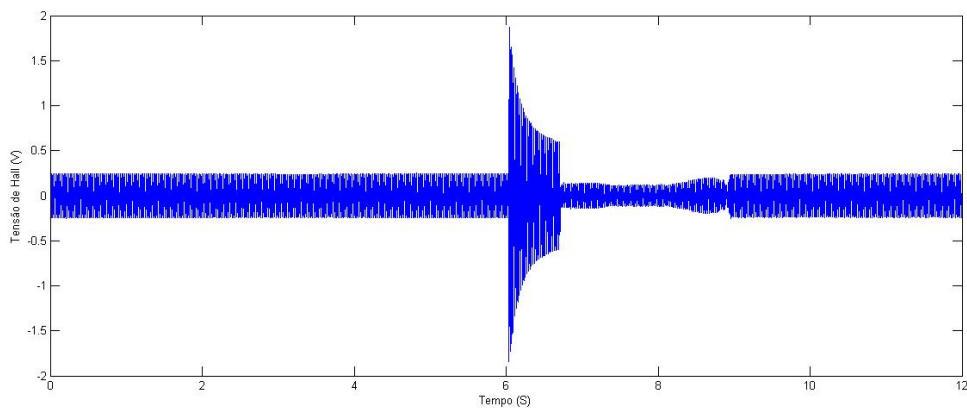


Figura 4.26: Tensão de Hall na fita B

Relativamente à tensão de Hall na fita C, que pode ser examinada na figura 4.26, esta tem um comportamento completamente diferente das anteriores. Durante o curto-circuito, o seu comportamento é idêntico ao das outras duas fitas. No entanto, após desligarmos o interruptor, ou seja, quando a falha termina, existem diferenças. A tensão de Hall diminui logo após voltar ao funcionamento normal no entanto no instante a seguir existe um aumento da densidade de fluxo magnético, ao contrário das outras duas fitas que nesta fase, a tensão de Hall em ambas diminuía transitando para o estado resistivo durante cerca de 2 segundos. Pode dizer-se que esta ação da fita C é uma ação de compensação devido à perda das propriedades supercondutoras das outras fitas neste intervalo de tempo. Este comportamento já foi observado anteriormente nos casos onde ocorreram o fenómeno de *quench*. Conclui-se que neste caso, foi possível detetar um *quench* em duas fitas, na fita A e B, logo após o curto-circuito. A fita C também consegue recuperar as suas

propriedades supercondutoras na sua totalidade após a falha.

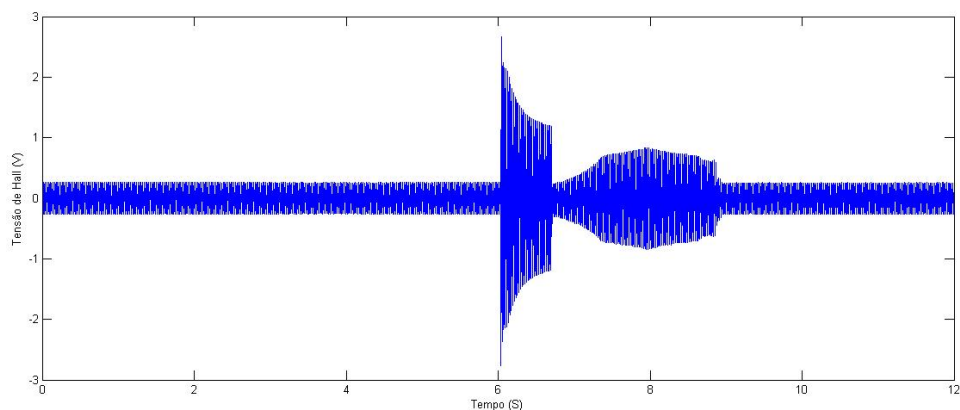


Figura 4.27: Tensão de Hall na fita C

Também se encontram diferenças no que toca aos resultados da tensão aos terminais do limitador. Com o auxílio da figura 4.28 constata-se que após o curto-circuito, como a fita C consegue compensar o *quench* das duas outras fitas, aumentando o seu campo magnético induzido, o limitador não apresenta praticamente tensão nenhuma aos seus terminais, sendo que esta diminui gradualmente ao contrário dos casos com uma ou duas espiras supercondutoras.

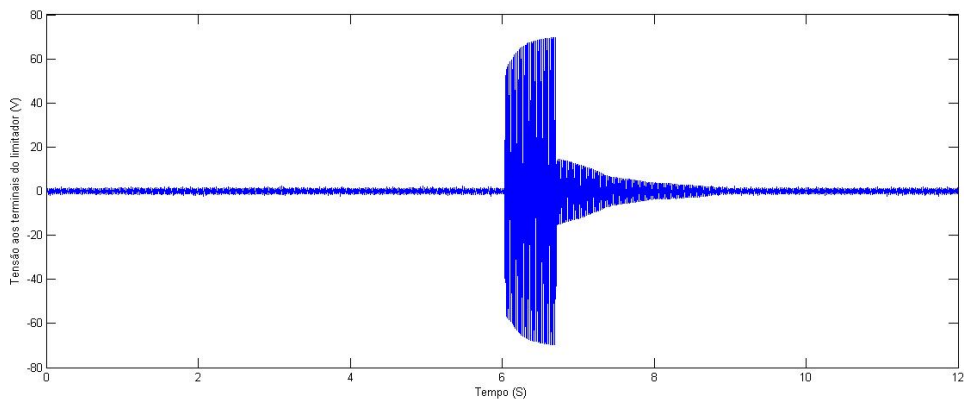


Figura 4.28: Tensão aos terminais do limitador com três espiras supercondutoras em caso de falha

#### 4.9 Ensaio 9: Três espiras supercondutoras, simulação de *quench*

Igualmente ao caso com duas espiras supercondutoras no secundário, este ensaio tem o objetivo de analisar o comportamento quer das fitas quer do limitador face a um fenómeno de *quench*. Serão feitos três testes, onde vamos variar o local onde o *quench* é feito (fita A, fita B ou fita C), onde se irá observar o comportamento de cada uma das fitas.

4.9.1 Simulação de *quench* na fita A

Examinado os resultados obtidos neste ensaio (figura 4.29), nota-se que o comportamento das fitas não difere do ensaio com apenas duas espiras supercondutoras. A fita A, onde é simulado o *quench* neste caso, como era de esperar, quando este é iniciado, aos 10 segundos, faz com que a fita comece a perder as suas propriedades supercondutoras. As outras duas fitas, B e C, tem o comportamento oposto. Quando a fita A começa a degradar-se, estas tratam de compensar este facto, aumentando o seu campo magnético indutivo.

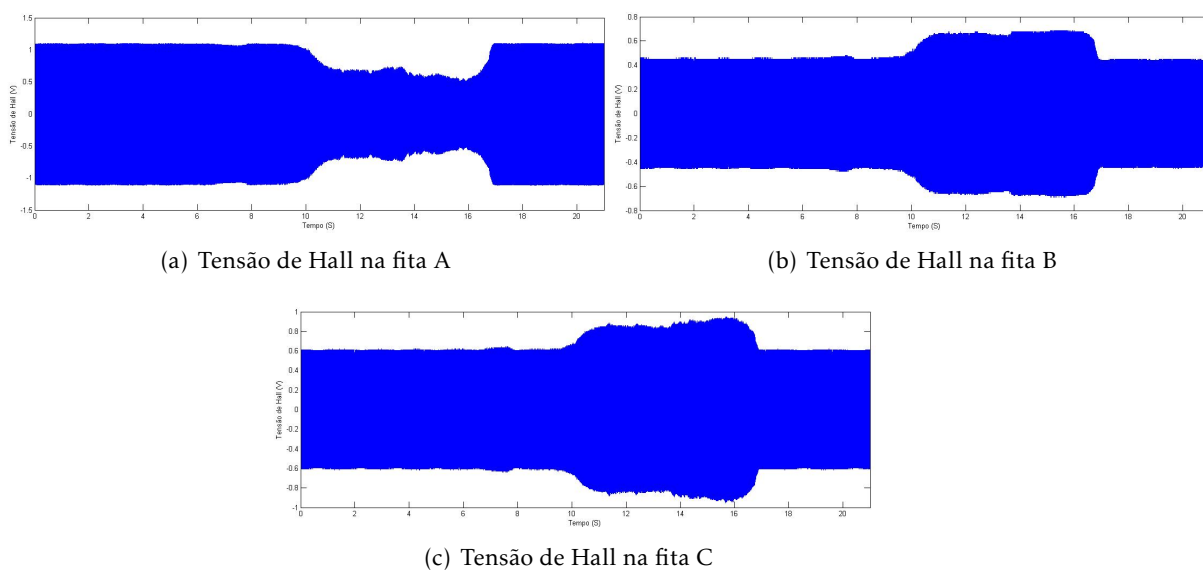


Figura 4.29: Tensões de Hall das espiras com *quench* na fita A

Observando a tensão aos terminais do limitador, existe uma ligeira variação desta quando a fita A começa a degradar-se. Porém a variação não é tão significativa comparando com os resultados quando apenas temos uma espira supercondutora. Este comportamento é naturalmente explicado, em semelhança ao caso com duas espiras supercondutoras, pelo facto das espiras B e C conseguirem compensar a perda das características supercondutoras da fita A.

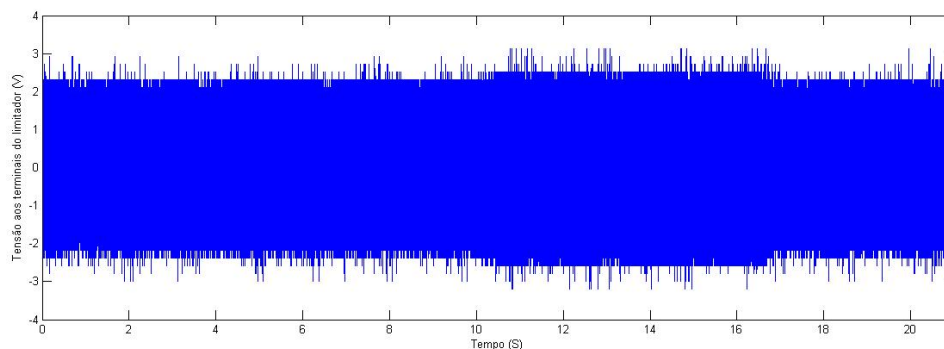


Figura 4.30: Tensão aos terminais do limitador com *quench* na fita A

### 4.9.2 Simulação de *quench* na fita B

Neste ensaio a única variante comparando com o teste anterior, vai ser o local onde vamos aplicar o *quench*. Neste caso, este vai ser simulado na fita B. Aplicando um *hotspot* nesta espira, vamos analisar o comportamento das restantes espiras.

Criando um *hotspot*, começando nos 20 segundos, o comportamento desta é igual aos casos anteriores. Quando este ponto quente começa a alastrar-se ao longo da fita B, esta perde parte das suas propriedades supercondutoras. Conquanto, não se pode dizer o mesmo das duas fitas restantes. A fita A tem um comportamento diferente. Os valores de tensão de Hall não se alteram ao longo do tempo. Apenas por volta dos 24 segundos existe uma diminuição mínima do campo magnético indutivo que é restabelecido logo no instante a seguir.

Analisando então a figura 4.31, pode-se dizer que a compensação é feita totalmente pela fita C.

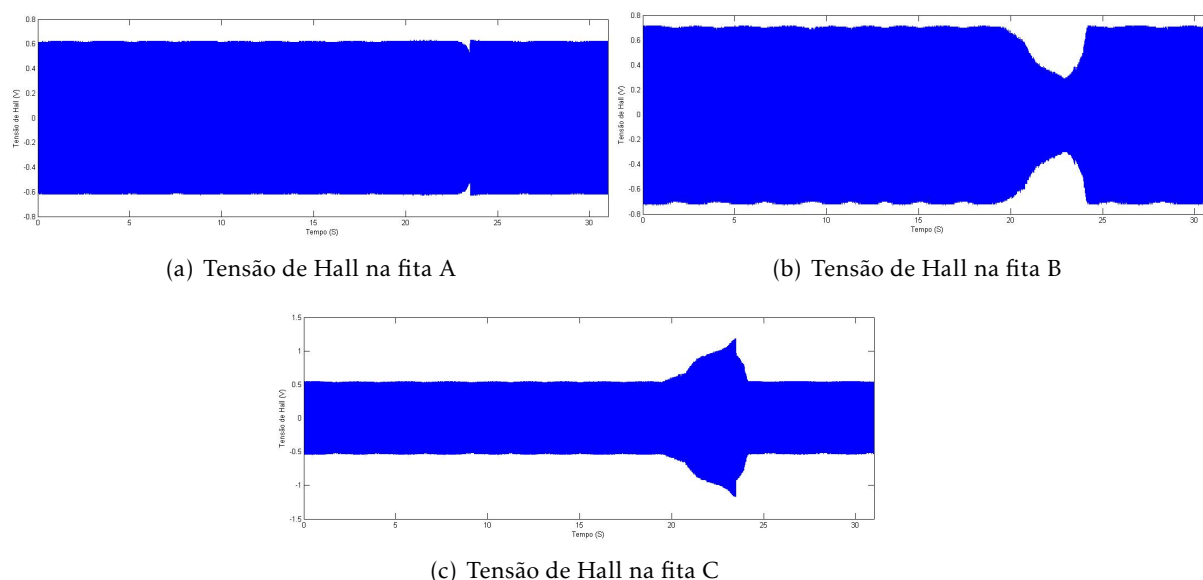


Figura 4.31: Tensões de Hall das espiras com *quench* na fita B

Relativamente à tensão aos terminais do limitador (figura 4.32), não existe qualquer variação significativa dos seus valores, concluindo-se que apenas a compensação feita pela fita C é suficiente para não haver um falso curto-circuito.

### 4.9.3 Simulação de *quench* na fita C

Por último, mas não menos importante, aplica-se então a resistência de aquecimento *heater*, à fita C e analisa-se o comportamento tanto desta fita, face à perda das suas propriedades como o comportamento das restantes fitas.

Neste último ensaio, acontece um fenómeno algo invulgar comparativamente aos ensaios anteriores. Como se pode observar pela figura 4.33, o *quench* é iniciado aos 20

#### 4.9. ENSAIO 9: TRÊS ESPIRAS SUPERCONDUTORAS, SIMULAÇÃO DE *QUENCH*

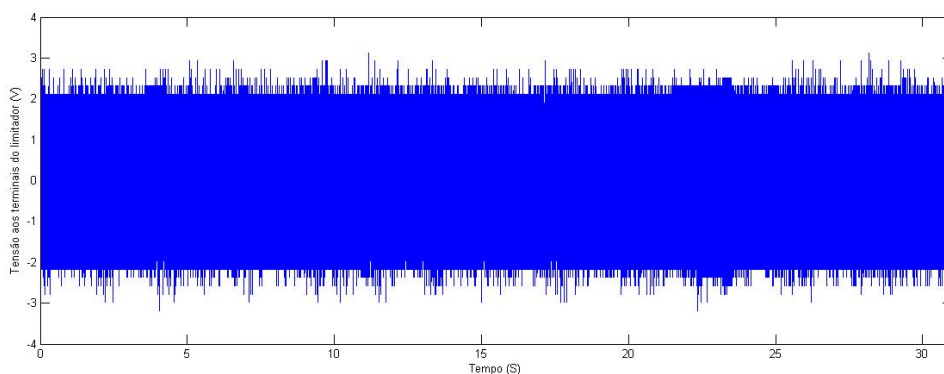
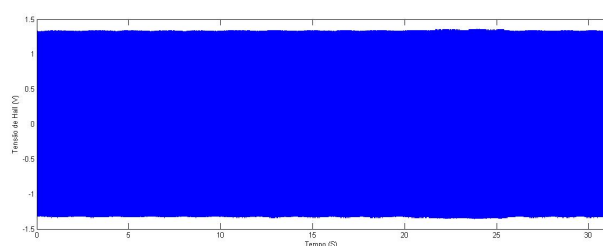
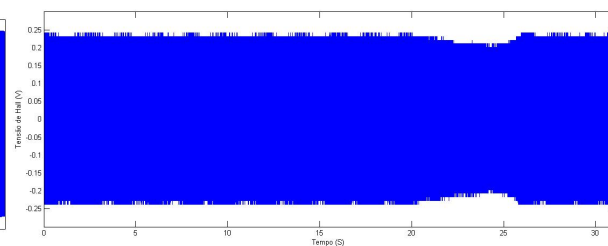


Figura 4.32: Tensão aos terminais do limitador com *quench* na fita B

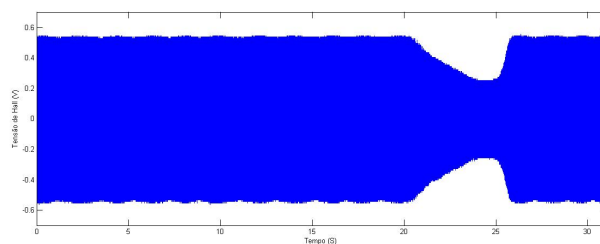
segundos, tornando a fita C cada vez mais resistiva à medida que o ponto quente se propaga. Porém nenhuma das outras fitas tem uma atuação de compensação relativamente a esta perda por parte da fita C, como aconteceu em qualquer outro ensaio onde houve uma simulação de *quench*. Pelo contrário, existe também uma ligeira redução do campo magnético indutivo na fita B. Observa-se também que a tensão de Hall da fita A, apesar de existir uma diminuição desta nas fitas B e C, mantém-se constante ao longo de todo o tempo.



(a) Tensão de Hall na fita A



(b) Tensão de Hall na fita B



(c) Tensão de Hall na fita C

Figura 4.33: Tensões de Hall das espiras com *quench* na fita C

Comparando os resultados dos ensaios com a simulação de *quench* com três espiras, de uma forma geral, pode-se identificar um certo padrão. À medida que o *quench* se distancia do primário, este vai tendo menos repercussões nas restantes fitas, ou seja, uma degradação na fita A, a fita que está mais próxima do secundário, vai ter mais repercussões nas fitas restantes comparativamente ao ensaio com a simulação de *quench* na fita C, a fita

que se encontra mais distante do primário.

Apesar de não haver compensação por parte de nenhuma fita, a tensão aos terminais do limitador não apresenta nenhuma variação anormal que represente um falso curto circuito como se pode ver pela figura 4.34. Este caso pode ser explicado pela diferença de campos magnéticos entre as fitas. A tensão de Hall na fita A é bastante superior ao das restantes fitas, possibilitando a compensação da perda das propriedades supercondutoras das fitas afetadas sem haver aumento de tensão de Hall por parte desta.

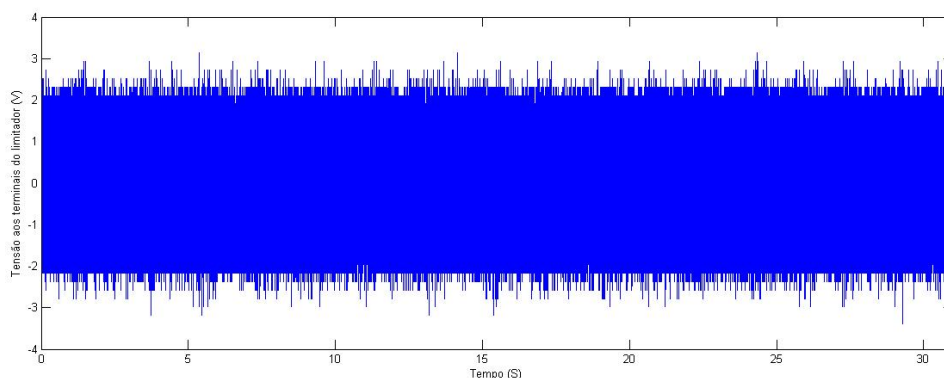


Figura 4.34: Tensão aos terminais do limitador com *quench* na fita C

## 4.10 Síntese e conclusões

Neste capítulo apresentaram-se e analisaram-se os resultados obtidos dos ensaios laboratoriais efetuados. Foram realizados vários ensaios com diferentes números de espiras no secundário variando também o anel supercondutor onde era aplicado o *quench*, permitindo assim observar os diferentes comportamentos das fitas. Com esta análise também foi possível saber se a perda de supercondutividade por parte das espiras poderia ser a causa de um falso curto-circuito.

## CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

Atingido assim o fim do presente trabalho é de grande importância enunciar as conclusões decorrentes da realização do mesmo, avaliando assim a aptidão do sistema de detecção em atingir os objetivos que foram propostos.

### 5.1 Conclusões

Um método de detecção de *quench* em fitas condutoras 2G é assim apresentado, tendo na sua base a leitura de campos de indução magnética, através de tensões de Hall, resultantes da implementação de *hotspots* nas varias fitas supercondutoras. O sistema desenvolvido possibilitou atingir os objetivos propostos inicialmente, não só de detecção do fenómeno *quench*, mas também a detecção de um falso curto-circuito no limitador. Este método confirmou experimentalmente a sua capacidade rápida e eficaz de detectar este tipo de problemas, graças a uma leitura e análise, bastante fácil e clara, dos campos de indução magnética gerados pelo sistema.

De referir que apesar do sistema ter sido construído com fins laboratoriais, visa com o seu estudo contribuir para a implementação deste método em sistemas deste tipo, onde é de grande importância precaver a destruição dos seus elementos mais importantes.

Alguns resultados podiam ser bastante mais satisfatórios principalmente em termos de criar um falso curto-circuito em laboratório. No entanto, criar uma falha destas no sistema provavelmente implicava o recurso a ensaios destrutivos, ou seja, ensaios onde iria haver a destruição de uma ou mais espiras supercondutoras, impedindo assim a utilização futura destas.

É importante de referir também as diferenças que existem quando utilizamos diferentes números de espiras supercondutoras. É de grande facilidade a adaptação do LCS às características da rede, através da escolha do número de espiras supercondutoras.

## 5.2 Trabalho futuro

Tendo em conta o bom desempenho do sistema mesmo com a existência de limitações ao nível de material disponível para o desenvolvimento do trabalho, era de esperar que este tipo de método possa, depois de melhorado, ser uma solução bastante viável para a deteção de *quench* em aplicações de maior complexidade. Para tal efeito propõem-se os seguinte pontos:

- Utilização deste método em dispositivos de maior complexidade e potências superiores, desde limitadores de corrente a bobinas presentes em sistemas de armazenamento de energia.
- Optimização dos ensaios experimentais, possibilitando a criação de um falso curto-circuito sem recorrer à destruição dos anéis supercondutores.
- Análise e explicação mais detalhada do comportamento da densidade de fluxo magnético nas espiras supercondutoras face ao diferente número de espiras no secundário e também face ao fenómeno de *quench*.



## BIBLIOGRAFIA

- [1] S. Blundell. "Superconductivity: A very Short Introduction". Em: *New York:Oxford University Press* (2009).
- [2] D. V. Delft e P. Kes. "The discovery of superconductivity The discovery of superconductivity feature". Em: *Physics Today* (2010).
- [3] C. Timm. "Theory of Superconductivity". Em: (2012).
- [4] T. Sheahen. *Introduction to High-Temperature Superconductivity*. Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [5] C. P. Bean. "Magnetization of high-field superconductors". Em: *Reviews of Modern Physics* (1964).
- [6] E. H. Brandt. "Superconductor disks and cylinders in an axial magnetic eld. I. Flux penetration and magnetization curves". Em: *Phys. Rev. B* 58 (1998).
- [7] R. M. Scanlan, A. P. Malozemoff e D. C. Larbalestier. "Superconducting materials for large scale applications". Em: *Proceedings of the IEEE* (2004).
- [8] H. Schmitt. "Fault Current Limiters Report on the Activities of CIGRE WG A3.16". Em: (2009).
- [9] Y Xin, W. Gong, X. Niu e Z. Cao. "Development of Superconducting Fault Current Limiters". Em: *International Conference on Power System Technology 1* (2006).
- [10] J. Pina. "Desenho e Modelização de Sistemas de Energia Empregando Materiais Supercondutores de Alta Temperatura". Em: (2010).
- [11] K. Bauml e U. Kaltenborn. "Inductive Shielded Superconducting Fault Current Limiter - A New Cost Effective Solution For Industrial Network Applications". Em: *Petroleum and Chemical Industry Conference Europe Conference Proceedings (PCIC EUROPE)* (2011).
- [12] T. Janowski, H. D. Stryczewska, S. Kozak, B. Kondratowicz-Kucewicz, G. Wojtasiewicz, J. Kozak, P. Surdacki e H. Malinowski. "Bi-2223 and Bi-2212 tubes for small fault current limiters". Em: *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 14 (2004).
- [13] J. M. Pfotenhauer, F. Kessler e M. A. Hilal. "Voltage detection and magnet protection". Em: *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* (1993).

- [14] N. Nanato, M. Yanagishita e K. Nakamura. "Quench detection of Bi-2223 HTS coil by partial active power detecting method". Em: *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* (2001).
- [15] B. Wei, Y. Yang, M. Qiu, H. Zhang, J. Zhu, P. Chen, D. Zhu e X. Lai. "The Quench Detection System for YBCO Superconducting Magnets". Em: 20 (2010).
- [16] J. H. Schultz. "Protection of superconducting coils". Em: *Review of Scientific Instruments* (2002).
- [17] D. F. Orris, M. J. Larnm, J. Nogiec, S. Sharonov e I. Nai. "A Digital Quench Detection System for Superconducting Magnets". Em: ().
- [18] J. D. Shaoxiong Nie, Jing Shi e J. Li. "Development of a digital quench detection and dumping circuit with constant voltage system for SMES". Em: *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* (2010).
- [19] M. Marchevsky e V. Selvamanickam. "Quench detection method for 2G HTS wire". Em: *Superconductor Science and Technology* (2010).

